

DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-2-121-132  
УДК 626/627

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

## Совместная работа ячеистой конструкции как системы «каркас – грунт засыпки – основание»

**В.А. Зимнюков\*, М.И. Зборовская**

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Российская Федерация, 127434, Москва,  
ул. Тимирязевская, д. 49  
\*zimnyukov@rgau-msha.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 25 января 2021 г.  
Доработана: 14 апреля 2021 г.  
Принята к публикации: 20 апреля 2021 г.

**Аннотация.** *Актуальность.* Опыт построенных ячеистых сооружений и результаты расчетных и модельных исследований, выполненных в нашей стране и за рубежом, по оценке совместной работы сложного комплекса «ячеистый каркас – грунт засыпки ячеек – основание» указывают на достаточную надежность таких гидротехнических сооружений. Основная сложность при проектировании ячеистых конструкций состоит в воспроизведении объемной работы комплекса «ячеистый каркас – грунт засыпки – грунт основания» для выявления резервов конструкции. *Цели.* Изучение путем проведения лабораторных исследований взаимодействия каркаса, грунта засыпки ячейки и основания при различной влажности грунта с учетом таких факторов, как гранулометрический состав грунта засыпки, роль поверхностного натяжения влаги, содержащейся в грунте, геометрические параметры самой конструкции и ряда других. *Методы.* Экспериментальные исследования на модели работы ячеистой конструкции без днища на нескальном (песчаном) основании на устойчивость при соблюдении критериев подобия, а также исследования ячеек, различающихся геометрией и размерами при изменениях влажности и гранулометрического состава грунта ячеек. *Результаты.* По результатам модельных исследований предложена зависимость по учету влияния сил поверхностного натяжения принимая во внимание гидравлический радиус поперечного сечения ячейки, смоченный периметр, площадь поперечного сечения ячейки и др. Рассмотрено взаимодействие ячеистой конструкции с основанием согласно указанным выше параметрам. Представлены результаты лабораторных исследований по учету взаимодействия каркаса, грунта засыпки ячейки при различной влажности заполнителя принимая в расчет гранулометрический состав грунта засыпки, поверхностное натяжение влаги, содержащейся в грунте, геометрические параметры самой конструкции и ряд других факторов.

**Ключевые слова:** ячеистая конструкция, каркас, грунт засыпки, формула Янсена, поверхностное натяжение, влажность грунта засыпки, капиллярное сцепление, гранулометрический состав грунта


### Для цитирования

Зимнюков В.А., Зборовская М.И. Совместная работа ячеистой конструкции как системы «каркас – грунт засыпки – основание» // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 2. С. 121–132. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-2-121-132>

Зимнюков Владимир Анатольевич, доцент кафедры гидротехнических сооружений, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова, кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 9152-1962, Scopus Author ID: 57219612774, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9892-146X>.

Зборовская Марина Ильинична, доцент кафедры гидротехнических сооружений, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова, кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 6748-0927, Scopus Author ID: 57219607364, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8405-8757>.

© Зимнюков В.А., Зборовская М.И., 2021

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Joint operation of the cellular structure as a system “frame – filling ground – base”

Vladimir A. Zimnyukov\*, Marina I. Zborovskaya

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya St, Moscow, 127434, Russian Federation  
\*zimnyukov@rgau-msha.ru

### Article history

Received: January 25, 2021

Revised: April 14, 2021

Accepted: April 20, 2021

**Abstract.** *Relevance.* The experience of constructed cellular structures and the results of computational and model studies carried out in our country and abroad to assess the joint work of the complicated complex “cellular frame – soil backfill of cells – foundation” indicates the sufficient reliability of such hydraulic structures. The main difficulty in the design of cellular structures is to reproduce the volumetric work of the complex “cellular frame – backfill soil – foundation soil” to identify structural reserves. *Objectives.* To study, through laboratory studies, the interaction of the frame and backfill of the cell and the base at different soil moisture, taking into account such factors as the granulometric composition of the backfill soil, the role of the surface tension of moisture contained in the soil, the geometric parameters of the structure itself and a number of other factors. *Methods.* Experimental studies on the model of the operation of a cellular structure without a bottom on a non-rocky (sandy) foundation for stability, subject to the similarity criteria, as well as studies of cells with different geometry and sizes with changes in moisture and particle size distribution of the soil of the cells. *Results.* Based on the results of model studies, a dependence is proposed to take into account the effect of surface tension forces, considering the hydraulic radius of the cell cross-section, wetted perimeter, cross-sectional area of the cell, etc. The interaction of the cellular structure with the base is also explored, taking into account the above parameters. The results of laboratory studies on considering the interaction of the frame and backfill of the cell soil at different moisture content of the aggregate, taking into account the granulometric composition of the backfill soil surface tension of moisture contained in the soil, geometric parameters of the structure itself and a number of other factors.

**Keywords:** cellular structure, frame, backfill soil, Jansen’s formula, surface tension, moisture content of backfill soil, capillary adhesion, soil granulometric composition

### For citation

Zimnyukov V.A., Zborovskaya M.I. Joint operation of the cellular structure as a system “frame – filling ground – base”. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(2):121–132. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-2-121-132>

### Введение

Ячеистые конструкции гидротехнических сооружений применяются практически во всех сферах водного хозяйства (плотины, здания ГЭС, наплавные блоки ГЭС, ледостойкие стационарные платформы (ЛСП), подпорные стенки, металлические и железобетонные ячеистые конструкции моллов, набережных, причалов, доков и др.). Начиная от деревянных ряжей и до современных тонкостенных причальных сооружений ячеистые конструкции подтвердили свою применимость и надежность. Эти конструкции просты по форме, легко вписываются в любой существующий рельеф, для их заполнения применяются любые местные материалы, что ускоряет сроки строительства и удешевляет их стоимость при достаточной прочности и надежности [1].

Также самое широкое применение находят ячеистые конструкции в других отраслях, особенно связанных со складированием различных материалов. Эти сооружения имеют много общих проблем с ячеистыми конструкциями гидротехнических сооружений (ГТС), особенно при рассмотрении вопроса об определении давления заполнителя в ячейке. Данный вопрос особенно актуален сегодня с учетом широкого применения металлических силосов различной конструкции, имеющих деформируемые под воздействием засыпки стены, для которых очень важна правильная последовательность их заполнения.

Но нестандартность технологий, используемых при возведении ячеистых конструкций ГТС, до сих пор тормозит их широкое внедрение в строительную практику, и основное тут – качественное и быстрое

*Vladimir A. Zimnyukov*, Associate Professor of the Department of Hydrotechnical Structures, Institute of Melioration, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov, Candidate of Technical Sciences. eLIBRARY SPIN-code: 9152-1962, Scopus Author ID: 57219612774, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9892-146X>.

*Marina I. Zborovskaya*, Associate Professor of the Department of Hydrotechnical Structures, Institute of Melioration, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov, Candidate of Technical Sciences. eLIBRARY SPIN-code: 6748-0927, Scopus Author ID: 57219607364, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8405-8757>.

выполнение бетонного каркаса и решение проблемы стыков для сборных конструкций, а также рациональное и наиболее выгодное для напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции сочетание бетонных и земляных работ (засыпки ячеек).

Сложность объемной работы комплекса «ячеистый каркас – грунт засыпки – грунт основания» создает трудности при экспериментальном и расчетном изучении работы комплекса при статических воздействиях, изучении устойчивости сооружения на сдвиг, температурных воздействиях с учетом накопленных к настоящему моменту данных и физических предпосылок о работе таких конструкций. Но очевидно, что решение данной задачи, пусть и постепенное, позволит лучше управлять работой ячеистых конструкций, усовершенствовать их, выявить резервы, что даст возможность сделать их более конкурентоспособными по сравнению с другими бетонными и грунтовыми плотинами.

Ячеистая конструкция удачно применена в составе селезащитной плотины (1976 г.) на р. Большая Алматинка для защиты г. Алма-Аты. Также в настоящее время рассматриваются проекты селезадерживающих плотин на р. Аксай и Улькен Алматы (железобетонная ячеистая плотина высотой (по селесбросу) 37,6 м, шириной 68 м, длиной 127 м) – инженерная защита территории, которая является частью государственного национального природного парка Казахстана [2].

Удачным оказался опыт применения ячеистых подпорных стен на Загорской ГАЭС. Реверсивный водоприемник верхнего бассейна решен по схеме руслового здания ГАЭС, то есть непосредственно воспринимает напор воды. С обеих сторон к устоям водоприемника примыкают левобережная и правобережная части грунтовой дамбы. Так как ширина дамбы значительно превышает ширину водоприемника вдоль потока, то для сопряжения ее с водоприемником с низовой и верховой сторон предусмотрены подпорные стенки в два яруса.

Конструкция стенок второго яруса неодинакова, более высокие стенки, расположенные ближе к водоприемнику, имеют ячеистую конструкцию. Более низкие стенки имеют уголкового профиля. Максимальная высота стенок 27,5 м, максимальная ширина 28,50 м, максимальная длина немногим более 25,00 м. Для отвода профильтровавшейся воды под стенками выполнен горизонтальный дренаж из песчано-гравийной смеси (ПГС), вода из которого по вертикальным дренажным скважинам выпускается в дренаж тела дамбы верхнего бассейна [3].

Согласно [4], задача учета давления засыпки на основание и стенки ячеистого каркаса является классической в механике сыпучих сред. Действующие в настоящее время строительные нормы и правила базируются на решении Янсена 1895 г., в которое вводится ряд поправочных эмпирических коэффициентов. В результате численных экспериментов с 3D-моделью авторы приходят к выводу, что «распределение давления сыпучего материала на дно и стенки емкости зависит не только от удельного веса материала и коэффициентов его внешнего и внутреннего трения, но и от способа засыпки емкости» Также отмечается, что при послойной засыпке ячейки с жестким днищем коэффициент бокового давления (распора) является постоянным по величине только при наличии сдвига дна ячейки вниз с постоянной малой скоростью. В случае перемещения дна ячейки (а это соответствует условиям проведения опытов инженера из Бремена, который также засыпал содержимое ячейки порциями и производил измерения в условиях, когда засыпка находилась в предельном состоянии) формула Янсена работает достаточно точно.

Как уже ранее отмечалось [5], существует ряд работ, которые можно разделить на два направления: 1) об учете взаимодействия засыпки с жестким основанием или же с днищем ячейки; 2) взаимодействие каркаса и засыпки с нескальным основанием. Наиболее известны работы Л.М. Емельянова и его последователя В.В. Алипова [5]. Отмечается, что вследствие вертикальных и горизонтальных нагрузок эффект зависания засыпки в ячейках распространяется до определенной глубины, а при врезании каркаса в грунт основания в нижней части ячейки трение по стенкам будет направлено в противоположную движению сторону и ближе к основанию ячейки давление грунта при пассивном состоянии засыпки (то есть восприятии ею части веса каркаса) будет больше активного. Согласно нашим исследованиям, важным является также учет влияния деформативности стенок каркаса ячеек, которая существенно влияет на работу тонкостенных конструкций. Необходимо накопление, систематизация и оценка данных для более точной оценки работы ячеистых конструкций гидротехнических сооружений на нескальном основании. Сегодня расчетные исследования позволяют продвинуть исследования о характере работы ячеистых конструкций и вывести оценку их работы на новый уровень. Обилие таких работ для силосов и бункеров подчеркивает важность данного вопроса и сложность их 3D-работы.

В 1965–1966 гг. в Гипроречтранс под руководством С.Н. Левачева были проведены лабораторные исследования кинематики взаимодействия гравитационных оболочек большого диаметра с грунтом ос-

нования и внутренней засыпки с «втягиванием» части засыпки в оболочку при сдвиге ее горизонтальной силой [6]. Также этот вопрос затронут в руководстве для корпуса инженеров американской армии, где даются рекомендации по расчетам устойчивости оболочек большого диаметра, в том числе с учетом влияния фильтрационного потока в ячеистой конструкции в основании [7].

Цель настоящего исследований – изучение взаимодействия каркаса, грунта засыпки ячейки и основания при различной влажности грунта в лабораторных условиях. При этом принимались во внимание такие факторы, как гранулометрический состав грунта засыпки, роль поверхностного натяжения влаги, содержащейся в грунте, геометрические параметры самой конструкции и ряд других факторов.

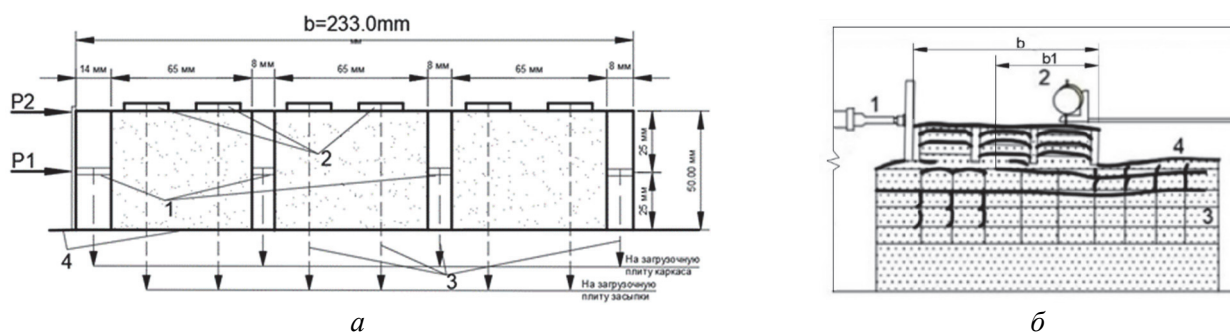
### Материалы и методы

Модельные исследования работы ячеистой конструкции без днища на нескальном (песчаном) основании на сдвиг проводились для оценки качественной картины протекающего процесса и выявления запаса устойчивости системы «ячеистая конструкция – засыпка – основание».

До настоящего времени ячеистые конструкции рассчитываются на устойчивость против сдвига по методике жесткого штампа, согласно СП 23.13330.2011 «Основания гидротехнических сооружений» (актуализированная редакция СНиП 2.02.02–85) (СП является составной частью национальной системы стандартизации Российской Федерации и действует на территории РФ). В соответствии с этой методикой, собственный вес сооружения моделируется одной вертикальной силой с заменой сооружения жестким (обычно квадратным) штампом, что не позволяет учесть особенности конкретного сооружения в случае работы сооружения без днища и взаимодействия грунта засыпки с основанием.

В исследованиях система «ячеистый каркас – грунт засыпки – грунт основания» моделируется в пределах существующих физических представлений о поведении таких систем и составляющих ее компонентов (ячеистых сооружений без днища на мягком основании с потерей устойчивости). Исследование проводилось в лаборатории прочности кафедры гидротехнических сооружений Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева.

Использовалась методика моделирования, согласно подходу А.Г. Назарова к решению задачи моделирования грунтов и нескальных оснований с доведением до разрушения ( $\alpha_e = 1$  – строгое подобие). Для эксперимента была изготовлена модель плотины высотой 50 мм, что соответствует масштабу  $\alpha_l = 80$  по отношению к натурному сооружению (рис. 1), моделирующая флютбет ячеистой конструкции.



**Рис. 1.** Схема модели ячеистого штампа с загрузочными устройствами и уровнями приложения сдвигающей силы  $P$  (а) и кинематика при сдвиге ячеистого штампа на песчаном основании с песчаной засыпкой при влажности песка 5 % (б):

а: 1 – анкеры для моделирования собственного веса каркаса ячейки; 2 – анкеры для моделирования собственного веса засыпки ячейки; 3 – система загрузки для моделирования собственного веса штампа; 4 – грунт-основание штампа;  $P1$ ,  $P2$  – уровни приложения сдвигающей нагрузки  $P$ ;

б: 1 – сдвигающий домкрат (создание сдвигающей силы  $P2$ ); 2 – индикатор часового типа для измерения перемещений;

3 – разметка грунта для наблюдения за перемещением грунта при сдвиге; 4 – перемещения грунта при сдвиге

**Figure 1.** Schematic of a model of a cellular die with loading devices and levels of application of a shear force  $P$  (a) and kinematics during shear of a cellular die on a sandy base with a sand backfill at a sand moisture content of 5% (b):

a: 1 – anchor for modeling the dead weight of the cell frame; 2 – anchor for modeling the dead weight of the cell backfill;

3 – loading system for modeling the dead weight of the stamp; 4 – soil-base of the stamp;  $P1$ ,  $P2$  – shear load application levels  $P$ ;

b: 1 – shearing jack (creating a shear force  $P2$ ); 2 – dial indicator for displacement measurement;

3 – marking the ground to observe the movement of the ground during shear; 4 – displacement of soil during shear

Для каркаса модели соотношение модулей упругости материалов каркаса природы (бетон) и модели (оргстекло)  $E_K^H/E_K^M = \frac{29000}{5250} = 5,5$ , что соответствует масштабу моделирования  $\alpha_E = \alpha_\sigma = 5,5$ .

Нагрузка системы «каркас – засыпка» моделировалась на основе существующей в лаборатории прочности кафедры гидротехнических сооружений методики приложения нагрузок на модели малого масштаба с помощью упругих элементов из капроновой нити (лесок) диаметром 0,8–0,1 мм (рис. 1, а). Сдвигающая сила прикладывалась к модели на двух уровнях: 25 (опыты серии I – P1) и 50 мм (опыты серии II – P2) и с помощью двух авиационных (масляных) домкратов, а собственный вес каркаса и засыпки воспроизводился с применением загрузочной системы с использованием упругих элементов и жестких металлических элементов для связи лесок нужной длины с двумя загрузочными подвесными платформами и воспроизведения заданного усилия. При этом две загрузочные подвесные платформы работали отдельно для каркаса и засыпки и нагрузка на них передавалась посредством загрузочных секторов (создавали необходимое плечо) и грузов. [5]. Во время эксперимента загрузочные устройства и платформы могли передвигаться вместе с моделью при потере устойчивости на сдвиг.

В качестве материала засыпки и основания был принят песок с характеристиками  $\gamma_3 = 0,016 \text{ МН/м}^3$ ,  $E_3 = 28 \text{ МПа}$ ,  $\varphi = 28,8^\circ$ ,  $\delta = 20^\circ$  (углы внутреннего и внешнего трения засыпки и основания соответственно) с целью получения качественной картины сдвига.

После достижения на модели значения собственного веса  $G$  и стабилизации ее состояния, прикладывалась сдвигающая сила ступенями по  $0,2P_{\text{расч}}$  ( $P_{\text{расч}} = G \cdot \text{tg}\varphi$ ) с фиксированием происходящих изменений с помощью индикаторов часового типа, прогибомеров, фотосъемки и отсыпанной из резиновой крошки сетки на контакте со стеклом лотка. Опыт серий I и II отличались между собой высотой приложения сдвигающей силы  $P$ : 25 и 50 мм соответственно (рис. 1).

При моделировании собственного веса каркаса и засыпки наблюдалась практически совместная работа каркаса и засыпки и не происходило смещение засыпки вдоль стен каркаса. При учете геометрического масштаба  $\alpha_l = 80$  мы имеем натурное сооружение – штамп высотой  $H = 0,05 \times 80 = 4,0 \text{ м}$  и внутренним размером ячейки  $a = 5,2 \text{ м}$ , что дает соотношение  $H/a = 0,77$  и не происходит развития предельного состояния на контакте «каркас – засыпка».

Так как в опытах I и II визуально при  $P = 0,8P_{\text{расч}}$  уже было заметно искажение сетки, нанесенной для наблюдений за основанием штампов, то расчет устойчивости штампов производился нами по методике СП 23.13330.2011 «Основания гидротехнических сооружений» (актуализированная редакция СНиП 2.02.02–85) по схемам глубинного и смешанного сдвигов.

При этом в обоих случаях при проверке на плоский сдвиг мы имели величину критерия  $N_\sigma = \sigma_{\text{max}}/(b \cdot \gamma) > 3$ , где  $\sigma_{\text{max}}$  – максимальное напряжение в основании штампа при  $P = 0,7P_{\text{расч}}$ ,  $b = 23,3 \text{ см}$  – ширина подошвы штампа,  $\gamma = 0,016 \text{ МН/м}^3$  – объемный вес основания штампа, то есть в обоих случаях не выполняется критерий по устойчивости штампов на плоский сдвиг и необходима проверка на смешанный сдвиг, что совпадает с данными опытов I и II.

Рассчитывая наши сдвигающие штампы для опытов I и II при  $P = 0,7P_{\text{расч}}$  (при  $P = 0,8P_{\text{расч}}$  уже отмечен сдвиг), мы получили под обоими штампами начало зоны пластических деформаций, составляющих для опыта I  $b_1 = 0,06b = 1,4 \text{ см}$ , а для опыта II  $b_1 = 0,065b = 1,5 \text{ см}$  (рис. 1, б).

Таким образом, под частью  $b_1$  подошвы штампа основание перешло в пластическое состояние и  $\tau = \tau_{\text{пред}} = \sigma \cdot \text{tg}\varphi \text{ МН/м}^2$ .

Дальнейшее увеличение нагрузки вызывает развитие пластических деформаций в основании моделей и расширение зоны  $b_1$  в ширину и по глубине (рис. 1, б).

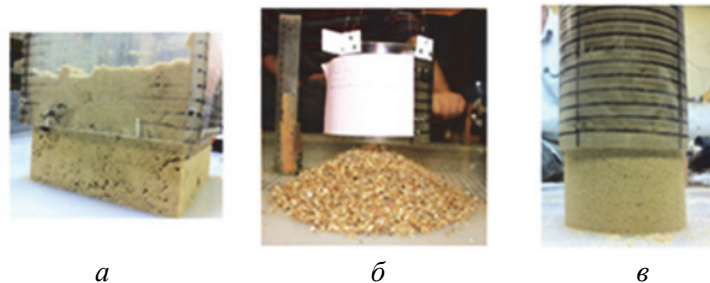
С целью расширения представлений о качественной и количественной сторонах явления устойчивости ячеистых конструкций с учетом перечисленных факторов необходимо изучение ячеистых штампов с  $H/a > 1,5\text{--}2$ , то есть работающих по типу силосов, а также учет большего диапазона изменения моментов сдвигающей силы и, возможно, увеличение масштаба модели.

Картина, аналогичная зафиксированной С.Н. Левачевым [6] для оболочки большого диаметра, была получена нами в опыте с песком влажностью 5 % без загрузки засыпки ячеек собственным весом при  $P = P_{\text{расч}}$ , приложенной на высоте 25 мм от подошвы штампа (рис. 1, б). В этом случае можно отметить, что каркас под действием собственного веса «врезается» в основание и влияет на направление движения грунта основания и засыпки.

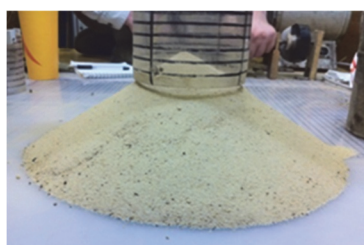
В процессе эксперимента с одиночными ячейками (рис. 2, а) получены данные о поведении крупнозернистого и мелкозернистого заполнителя и мелкого песка разной влажности при высыпании из ячейки, свидетельствующие о влиянии высоты ячейки и влажности песка на величину зависания засыпки на стенках ячейки. В опытах рассматривались низкие ячейки с высотой, примерно равной поперечному размеру ячейки, и высокие ячейки, в которых высота примерно в 4 раза превосходила поперечный размер.

Для этого были собраны ячеистые фрагменты из оргстекла в виде (рис. 2): *a* – кубика без дна и крышки:  $a = 16$  см,  $H = 16$  см ( $H/a = 1$ ); *б* – низкого цилиндра:  $\varnothing = 11$  см,  $r = 5,5$  см,  $H = 9,5$  см ( $H/a = 0,86$ ); *в* – высокого цилиндра:  $\varnothing = 11$  см,  $r = 5,5$  см,  $H = 39,5$  см ( $H/a = 3,59$ ).

В качестве засыпки использовались три вида материала: крупнозернистый – каменная крошка, естественная влажность – 3 %; среднезернистый – каменная крошка, естественная влажность – 3 %; мелкий песок, естественная влажность – 3 %.



**Рис. 2.** Испытания на поднятие ячеек  
**Figure 2.** Cell lifting tests



Мелкий песок естественной влажности  
Fine sand of natural moisture



Мелкий песок, влажность 5 %  
Fine sand, moisture 5%



Мелкий песок, влажность 10 %  
Fine sand, moisture 10%



Среднезернистый материал естественной влажности  
Medium-grained material of natural moisture



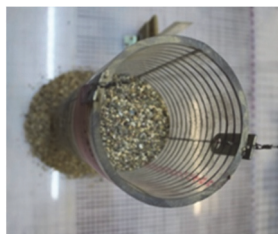
Среднезернистый материал, влажность 5 %  
Medium grain material, 5% moisture



Среднезернистый материал, влажность 10 %  
Medium grained material, 10% moisture



Крупнозернистый материал естественной влажности  
Coarse material of natural moisture



Крупнозернистый материал, влажность 5 %  
Coarse material, 5% moisture



Крупнозернистый материал, влажность 10 %  
Coarse material, 10% moisture

**Рис. 3.** Результаты испытаний на поднятие ячеек  
**Figure 3.** Cell lifting tests results

В установленную на стенде форму загрузался грунт необходимой влажности без какого-либо уплотнения. Поднималась ячейка с определенным шагом от поверхности испытательной площадки. В процессе

поднятия на фиксированных отметках снимались показания динамометра, измерялся радиус рассыпания грунта (рис. 2).

Благодаря проведенным опытам мы получили графики поведения грунта различной влажности и гранулометрического состава при испытании по поднятию ячеек (рис. 3 и 4). Как правило в графиках, представленных на рис. 4, самая нижняя ветвь соответствует естественной влажности грунта – заполнителя ячейки, при которой грунт постепенно высыпается из ячеистого фрагмента при его поднятии на 1/5–1/3 высоты ячейки.

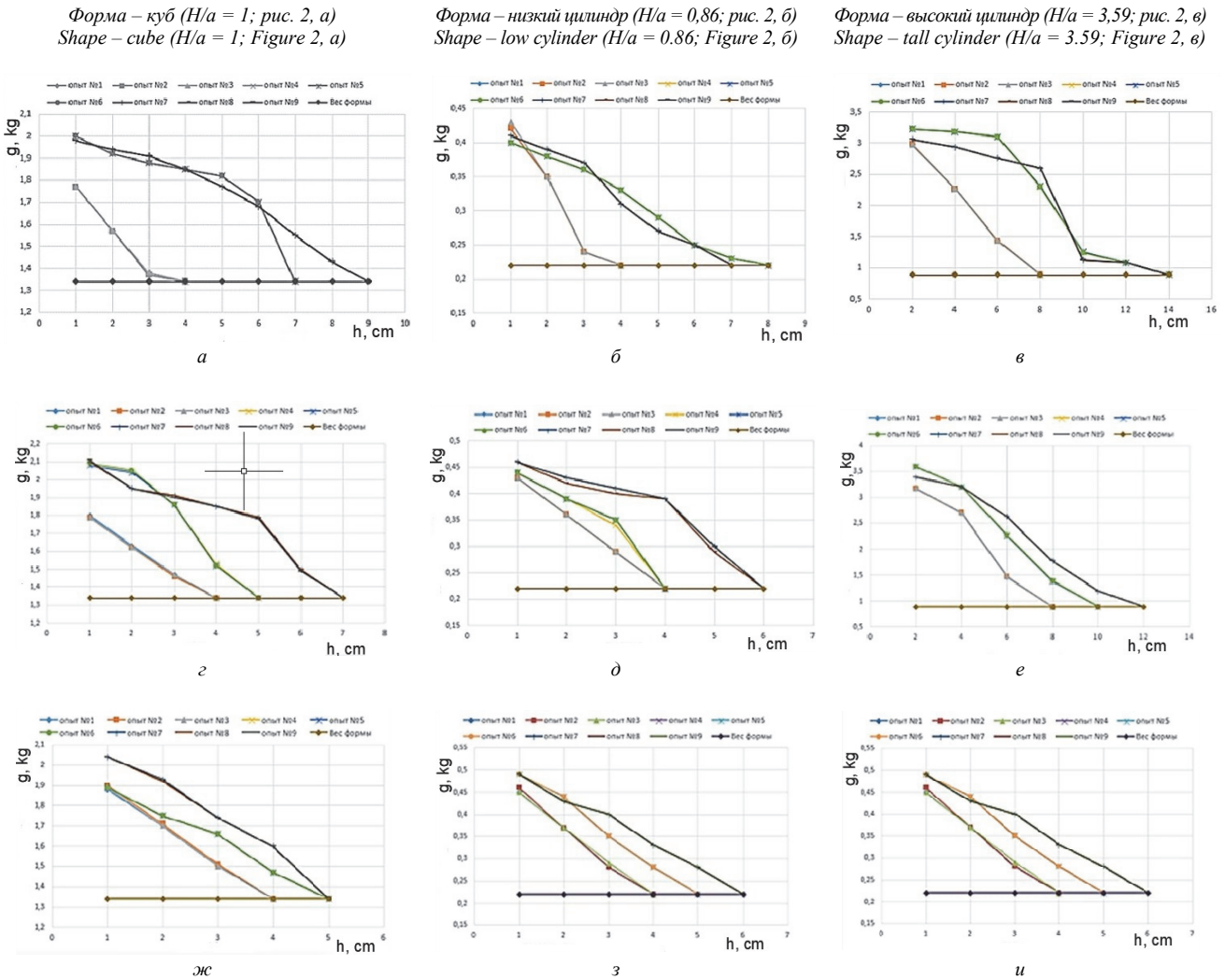


Рис. 4. Диаграммы зависимости веса ячейки от высоты ее поднятия

и влажности засыпки из мелкозернистого песка (а–в), среднезернистого песка (г–е) и крупнозернистого материала (ж–и): опыты 1–3 – грунт естественной влажности; опыты 4–6 – влажность грунта 5%; опыты 7–9 – влажность грунта 10%

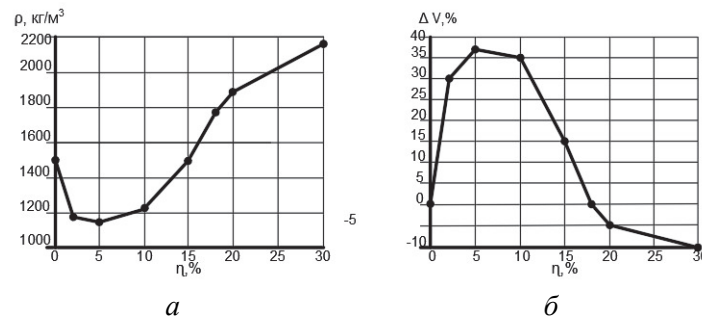
Figure 4. Diagrams of the dependence of the cell weight on the height of its rise

and the moisture content of the backfill from fine-grained sand (a–b), medium-grained sand (c–e), and coarse-grained material (ж–и): experiments 1–3 – natural moisture; experiments 4–6 – soil moisture 5%; experiments 7–9 – soil moisture 10%

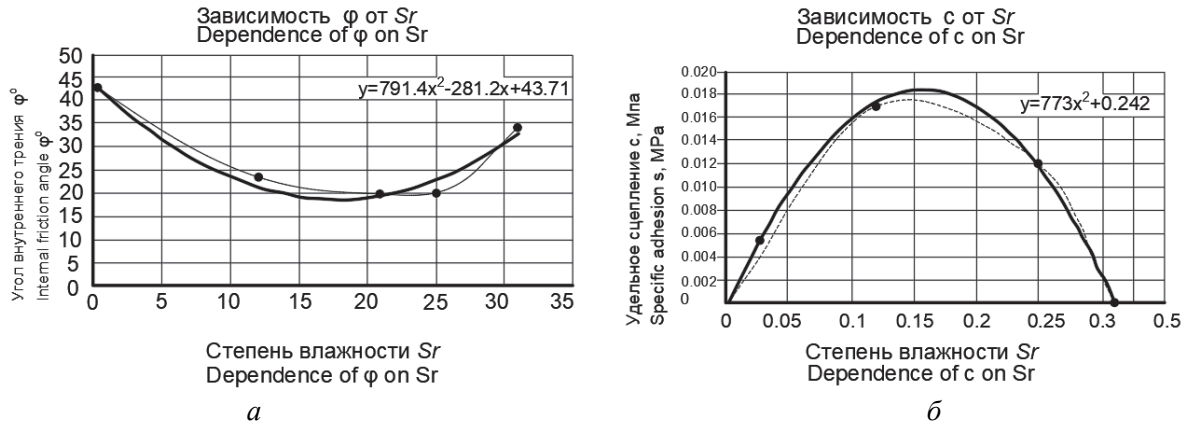
### Результаты и обсуждение

О существенном влиянии влажности песка на его поведение говорится и в [8]. Авторы представили графики зависимости насыпной плотности песка от его влажности, а также зависимость изменения объема песка от его влажности (рис. 5).

В [9] путем испытаний для несвязного грунта различной степени влажности (в зависимости от коэффициента водонасыщенности  $S_r$ ) изучалось изменение прочностных характеристик несвязного грунта ( $\phi$  и «с» песка) методом одноплоскостного среза – рис. 6.



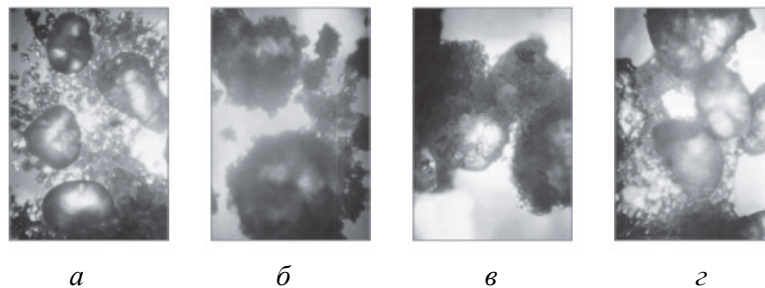
**Рис. 5.** Зависимость плотности  $\rho$  (а) и объема песка  $\Delta V$  (б) от влажности песка  $\eta$  [8]  
**Figure 5.** Dependence of density  $\rho$  (а) and volume of sand  $\Delta V$  (б) on sand moisture  $\eta$  [8]



**Рис. 6.** Зависимости угла внутреннего трения и удельного сцепления грунта от степени влажности  $S_r$  [9]  
**Figure 6.** Dependences of the angle of internal friction and the specific cohesion of the soil on the degree of moisture  $S_r$  [9]

Как видно из графиков для  $S_r$ , равного примерно 0,15, угол внутреннего трения песка  $\varphi$  имеет минимальное значение, равное  $19^\circ$ , но при этом проявляется связность грунта «с», которая возрастает практически с нуля до 0,018 МПа. То есть наблюдается максимальное проявление сил сцепления в песке при степени влажности грунта  $S_r \cong 0,15$ , что при средней пористости песка 0,40–0,36 [10] соответствует влажности песка порядка 5 %.

Как уже отмечалось авторами в [11] и согласно [12], для сырьевых составов при приготовлении бетона в трехфазных системах с частицами диаметром до 1–2 мм главными являются усилия капиллярного взаимодействия и их действием объясняются максимальные зависимости насыпного объема и прочности изделий (рис. 7). Как видно из графиков на рис. 5 и 6, при влажности 4–10 % плотность песка наименьшая, а объем и пористость песка наибольшие.



**Рис. 7.** Капиллярные структуры в смеси Вольского и молотого песка при влажности:  
 а – 0 %; б – 3 %; в – 6 %; г – 9 % [12]  
**Figure 7.** Capillary structures in a mixture of Volsky and ground sand at humidity:  
 а – 0%; б – 3%; в – 6%; г – 9% [12]

На любой элемент поверхностного слоя примыкающие к нему соседние участки действуют с силой, стремящейся удержать его в растянутом состоянии. Эти силы направлены вдоль поверхностного

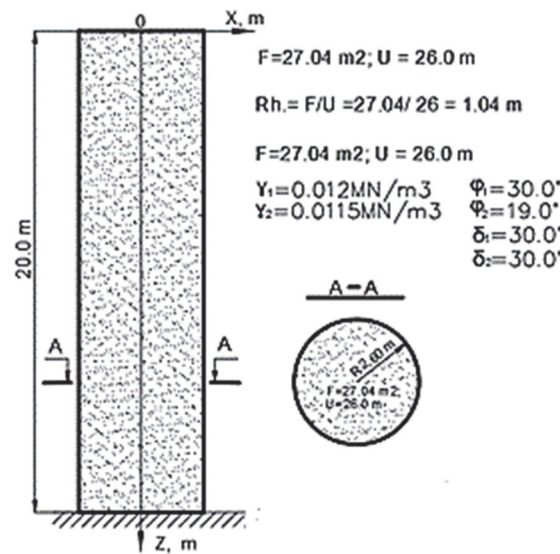


слоя и называются силами поверхностного натяжения. И тогда песок при его небольшом увлажнении становится связанным и держит вертикальные откосы, о высоте которых в ячеистой конструкции пока сложно говорить.

Мы предлагаем учесть влияние влажности в формуле давления грунта в ячейке Янсена в виде силы поверхностного натяжения воды  $P_{s.t.}$  ( $K_{s.t.}$  – переходный коэффициент для силы поверхностного натяжения воды, м<sup>2</sup>;  $R_h$  – гидравлический радиус поперечного сечения ячейки, м;  $U$  – «смоченный» периметр ячейки, м;  $F$  – площадь поперечного сечения ячейки, м<sup>2</sup>):

$$P_{s.t.} = R_h \cdot \sigma_z \frac{\gamma}{\xi \cdot \text{tg} \delta} R_h \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\xi \cdot \text{tg} \delta}{R_h} Z} \right) = K_{s.t.} R_h^2 \cdot \sigma_z \frac{\gamma}{\xi \cdot \text{tg} \delta} \left( 1 - e^{-\frac{\xi \cdot \text{tg} \delta}{R_h} Z} \right), \text{ Н/м} \quad (1)$$

где  $\sigma_z$  – вертикальное давление в ячейке на глубине  $Z$  от действия силы тяжести;  $\gamma$  – объемный вес заполнителя ячейки, Н/м<sup>3</sup>;  $\xi$  – коэффициент бокового давления засыпки в ячейке;  $\text{tg} \delta$  – коэффициент трения между засыпкой и стенкой ячейки (рис. 8).



**Рис. 8.** Схема к расчету по определению давления засыпки в ячейке:  
*индекс 1* – данные по варианту 1; *индекс 2* – данные по варианту 2  
**Figure 8.** Scheme for the calculation to determine the backfill pressure in the cell:  
*index 1* – data for option 1; *index 2* – according to option 2

Основные параметры для расчета давления засыпки в ячейке представлены на рис. 8. Коэффициент бокового давления засыпки в ячейке (люберецкого песка) принимаем по зависимости  $\xi = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$ . Для варианта 1  $\xi = 0,3333$ , а для варианта 2 имеем по данной зависимости  $\xi = 0,7133$  (таблица). Величина коэффициента внешнего трения  $\text{tg} \delta = 0,7002$  одинакова для вариантов 1 и 2 с точки зрения используемых материалов для засыпки и каркаса.

Качественное влияние поверхностного натяжения влаги, содержащейся в грунте, представлено на рис. 2, а и в, где грунт засыпки ячейки – песок – имеет влажность порядка 5 % по весу. Таким образом, для песка, согласно описанным выше свойствам, при влажности 5 % мы имеем явление поверхностного натяжения в засыпке, которое наблюдается на некотором расстоянии от дна ячейки для расчетного варианта 2 (до  $z \approx 10,0$  м) (таблица). Развивается поверхностное натяжение водной пленки, по нашим предположениям, до величины  $P_{s.t.} = 0,073$  Н/м (равно величине поверхностного натяжения воды). Величина  $P_{s.t.}$  для расчетного варианта 1 (таблица) превосходит величину поверхностного натяжения воды и грунт на всем протяжении засыпки ячейки по высоте не имеет связей между частицами и достаточно быстро высыпается при поднятии ячейки (рис. 4, а).

Предложенная формула отражает факт влияния влажности на давление засыпки в ячейке и на характер и величину параметров устойчивости ячеистых конструкций.

**Расчеты по определению давления засыпки в ячейке  $\sigma_z$  и  $\sigma_x$   
и величине поверхностного натяжения  $P_{s.t.}$  согласно формуле (1)**

Вариант 1				Вариант 2			
Z, m	$\sigma_z$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$P_{s.t.}$ , Н·м	Z, m	$\sigma_z$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$P_{s.t.}$ , Н·м
$R = F/U = 1,04$ м – гидравлический радиус. Коэффициент бокового давления засыпки $\xi = 0,3333$ . Коэффициент внешнего трения $\text{tg}\delta = 0,7002$ . $\gamma_1 = 0,012 \text{ MN/m}^3$				$R = F/U = 1,04$ м – гидравлический радиус. Коэффициент бокового давления засыпки $\xi = 0,7133$ . Коэффициент внешнего трения $\text{tg}\delta = 0,7002$ . $\gamma_2 = 0,0115 \text{ MN/m}^3$			
0,0	0	0	0	0,0	0	0	0
2,5	0,0230	0,0077	0,070	2,5	0,0017	0,0012	0,005
5,0	0,0360	0,0120	0,110	5,0	0,0217	0,0155	0,066
7,5	0,0440	0,0147	0,1345	7,5	0,0232	0,0165	0,071
10,0	0,0480	0,0160	0,147	10,0	0,0237	0,0169	0,0725
12,5	0,0510	0,0170	0,156	12,5	0,0238	0,0200	0,073
15,0	0,0520	0,0173	0,159	15,0	0,0239	0,0213	0,073
17,5	0,0529	0,0176	0,162	17,5	0,0239	0,0213	0,073
20	0,0530	0,0177	0,162	20	0,0239	0,0213	0,073

Table

**Calculations for determining the backfill pressure in the cell  $\sigma_z$  and  $\sigma_x$   
and the value of surface tension  $P_{s.t.}$  according to formula (1)**

Option 1				Option 2			
Z, m	$\sigma_z$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$P_{s.t.}$ , Н·м	Z, m	$\sigma_z$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$P_{s.t.}$ , Н·м
$R = F/U = 1.04$ m – hydraulic radius. Backfill lateral pressure coefficient $\xi = 0.3333$ . External friction coefficient $\text{tg}\delta = 0.7002$ . $\gamma_1 = 0.012 \text{ MN/m}^3$				$R = F/U = 1.04$ m – hydraulic radius. Backfill lateral pressure coefficient $\xi = 0.7133$ . External friction coefficient $\text{tg}\delta = 0.7002$ . $\gamma_2 = 0.0115 \text{ MN/m}^3$			
0.0	0	0	0	0.0	0	0	0
2.5	0.0230	0.0077	0.070	2.5	0.0017	0.0012	0.005
5.0	0.0360	0.0120	0.110	5.0	0.0217	0.0155	0.066
7.5	0.0440	0.0147	0.1345	7.5	0.0232	0.0165	0.071
10.0	0.0480	0.0160	0.147	10.0	0.0237	0.0169	0.0725
12.5	0.0510	0.0170	0.156	12.5	0.0238	0.0200	0.073
15.0	0.0520	0.0173	0.159	15.0	0.0239	0.0213	0.073
17.5	0.0529	0.0176	0.162	17.5	0.0239	0.0213	0.073
20	0.0530	0.0177	0.162	20	0.0239	0.0213	0.073

О «расхождении экспериментальных и расчетных данных при расчете внутренней засыпки как внешней нагрузки (по Янсену) без учета изменений условий взаимодействия оболочки и наполнителя при деформировании системы» говорится в [13]. Рассмотренный нами вопрос также может внести вклад в рассмотрение проблемы давления засыпки в ячейке и расчеты ячеистых конструкций.

Также рассматриваемые вопросы могут быть использованы и при анализе работы современных силовых для хранения зерна.

### Заключение

По полученным данным мы можем сделать следующие выводы.

1. Установлено, что чем больше влажность грунта – засыпки, тем медленнее происходит процесс его высыпания из ячейки, так как при этом возрастает давление на контактную поверхность каркаса ячейки, вызванное взаимодействием молекул воды и частиц грунта (возникает дополнительное горизонтальное давление – распор). Следовательно, влажность играет значительную роль в этом процессе. Фактически мы имеем три стадии поведения грунта в ячеистой конструкции: а) грунт в сухом состоянии; б) грунт в состоянии влажности с проявлением поверхностного натяжения; в) грунт во влажном состоя-

нии, при котором перестают действовать силы поверхностного натяжения, но усиливается горизонтальное давление грунта на стенки ячейки, так как объем грунта больше, чем у сухого материала, вследствие расклинивающего действия воды.

2. Установлена зависимость поведения грунта различной влажности от его гранулометрического состава при взаимодействии с каркасами ячеек, отличающимися по геометрическим параметрам (рис. 4).

Как правило в графиках, представленных на рис. 4, самая нижняя ветвь соответствует естественной влажности грунта – заполнителя ячейки, при которой грунт постепенно высыпается из ячейки при ее поднятии.

Средние ветви соответствуют влажности грунта – заполнителя ячейки – 5 %, что для песка на рис. 5, б соответствует максимальному изменению объема и, как мы считаем, величине сил поверхностного натяжения в материале засыпки (в песке). Но при этом влияние поверхностного натяжения на поведение материала в ячейке более полно проявляется там, где мы имеем взаимовлияние стенок ячейки, то есть в тех случаях, когда линия сдвига грунта не выходит за пределы ячейки. Для случая круглого ячеистого фрагмента с отношением  $H/a < 1$  засыпка ведет себя скорее как грунт, находящийся за подпорной стенкой.

3. При воспроизведении работы комплекса «каркас ячейки – грунт засыпки – основание» методами численного эксперимента следует учитывать, что применяемые расчетные схемы часто являются довольно далекими от реальных условий работы таких конструкций как при сборе всех нагрузок на ячеистый каркас, так и при моделировании условий контакта стенок ячейки с наполнителем и грунтом основания [14–19]. Сравнение экспериментальных и расчетных данных часто указывает на несоответствие расчетных значений напряжений и перемещений действительным при существующей традиционной методике компьютерного моделирования подобных сооружений. Также считаем необходимым отметить, что проведение расчетных исследований по современным программным комплексам, например MIDAS GTS NX [14], требует изучения характеристик грунта с учетом его пластической работы и приближения к реальным условиям работы столь сложной конструкции. В противном случае увеличение точности расчета, даже с использованием мощной программы на ЭВМ, является не нужной самоцелью при низкой точности исходных данных, не отвечающих физике явления.

### Список литературы

1. Зимнюков В.А., Зборовская М.И., Герасимов М.Ю. Применение ячеистых конструкций в гидротехнических сооружениях // Проблемы научного обеспечения развития эколого-экономического потенциала России: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. М.: МГУП, 2004. С. 45–49.
2. Бакарасова Т.В., Зиневич Ю.Н., Хожаназаров Е.К. Проектирование и строительство селезащитных сооружений в Казахстане: современный этап: 2008–2018 // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: труды 5-й Международной конференции (Тбилиси, 1–5 октября 2018). Тбилиси: Универсал, 2018. С. 271–282.
3. Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Атабиев И.Ж., Мельникова Н.И. Расчетные исследования устойчивости и прочности подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС // Природообустройство. 2012. № 2. С. 44–48.
4. Клишин С.В., Ревуженко А.Ф. Исследование задачи Янсена методом дискретных элементов в трехмерной постановке // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых СО РАН. 2014. № 3. С. 10–16.
5. Зборовская М.И. Анализ работы ячеистых конструкций гидросооружений на статические и температурные воздействия: дис. ... канд. техн. наук. М.: Московский государственный университет природообустройства, 1995.
6. Левачев С.Н. Оболочки в гидротехническом строительстве. М.: Стройиздат, 1978. 168 с.
7. Engineering and design. Design of sheet pile cellular structures cofferdams and retaining structures. Engineer Manual. U.S. Army Corps of Engineers, 1989. P. 32.
8. Матвеев Ю.И., Костенко В.И., Хмелев В.Н., Генне Д.В. Экспериментальные исследования опытного ультразвукового пенетрационного устройства на модельных средах, имитирующих реголит луны // Южно-Сибирский научный вестник. 2018. № 1 (21). С. 42–48.
9. Попова А.В., Цимбельман Н.Я. Зависимость прочностных свойств грунтов от природной влажности // Волгодонские чтения. Строительство и архитектура. 2009. № 76. С. 3–4.
10. Косырев И.А. Пористость как индикатор изменения инженерно-геологических условий на примере строительства зданий на территории ОАО «КБХА» города Воронежа // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2012. № 2. С. 218–234.
11. Зимнюков В.А., Зборовская М.И. Учет влияния влажности на совместную работу грунта засыпки и каркаса ячейки // Труды Академии проблем водохозяйственных наук. Вып. 12. Актуальные проблемы водохозяйственного строительства М.: МГУ, 2018. С. 150–158.
12. Белов В.В., Новиченкова Т.Б., Образцов И.В. Капиллярное структурообразование сырьевых композиций на основе минеральных вяжущих веществ // Нанотехнологии в строительстве. 2010. № 4. С. 23–36.

13. Беккер А.Т., Цимбельман Н.Я., Чернова Т.И. Определение параметров и верификация математической модели конструкций из заполненных оболочек на сжимаемом основании // Известия всероссийского научно-исследовательского института гидротехники имени Б.Е. Веденеева. 2016. № 280. С. 10–23.
14. Программный комплекс MIDAS GTS NX. URL: <http://ru.midasuser.com/web/page.php?no=65> (дата обращения: 12.09.2020).
15. Li L., Aubertin M. Horizontal pressure on barricades for backfilled stopes. Part I. Fully drained conditions // *Can. Geotech. J.* 2009. Vol. 46. Pp. 37–46. <https://doi.org/10.1139/T08-104>
16. Li L., Aubertin M. Horizontal pressure on barricades for backfilled stopes. Part II. Submerged conditions // *Can. Geotech. J.* 2009. Vol. 46. Pp. 47–56. <https://doi.org/10.1139/T08-105>
17. Mkadmi N.E., Aubertin M., Li L. Effect of drainage and sequential filling on the behavior of backfill in mine stopes // *Can. Geotech. J.* 2014. Vol. 51. Pp. 1–15. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0462>
18. Shao L., Zhou X., Zeng H. Comparison of soil pressure calculating methods based on terzaghi model in different standards // *The Open Civil Engineering Journal*. 2016. Vol. 10. No. 1. Pp. 481–488. <https://doi.org/10.2174/1874149501610010481>
19. Lévesque Y., Saeidi A., Rouleau A. Estimating earth pressure exerted by the backfill on the vertical pillars in underground mine stopes // *GeoVancouver 2016*. Vancouver, 2016.

### References

1. Zimnyukov V.A., Zborovskaya M.I., Gerasimov M.Yu. Application of cellular structures in hydraulic structures. *Problems of Scientific Support for the Development of the Ecological and Economic Potential of Russia: Collection of Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference*. Moscow: MGUP Publ.; 2004. p. 45–49. (In Russ.)
2. Bakarsova T.V., Zinevich Yu.N., Khozhanazarov E.K. Design, and construction of mudflow protection structures in Kazakhstan: modern stage: 2008–2018. Mudflows: Disasters, Risk, Forecast, Protection: Proceedings of the 5th International Conference (Tbilisi, 1–5 October 2018). Tbilisi: Universal Publ.; 2018. p. 271–282. (In Russ.)
3. Lisichkin S.Ye., Rubin O.D., Atabiev I.Zh., Melnikova N.I. Computational studies of the stability and strength of the retaining walls of the first tier of the water intake of the Zagorskaya PSPP. *Prirodoobustroistvo*. 2012;(2):44–48. (In Russ.)
4. Klishin S.V., Revuzhenko A.F. 3D discrete element approach to Janssen’s problem. *Journal of Mining Science*. 2014;50(3):417–422. <https://doi.org/10.1134/S1062739114030028>
5. Zborovskaya M.I. *Analysis of the work of cellular structures of hydraulic structures for static and temperature effects* (Ph.D. thesis). Moscow: Moscow State University of Environmental Engineering; 1995.
6. Levachev S.N. *Shells in hydraulic engineering*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1978. (In Russ.)
7. *Engineering and design. Design of sheet pile cellular structures cofferdams and retaining structures. Engineers Manual*. US Army Corps of Engineers; 1989.
8. Matveev Y.I., Kostenko V.I., Khmelev V.N., Genne D.V. Experimental studies of an experimental ultrasonic penetration device on model media simulating the regolith of the moon. *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2018;1(21):42–48. (In Russ.)
9. Popova A.V., Tsimbelman N.Ya. Dependence of the strength properties of soils on natural moisture. *Vologdinskije Chteniya*. 2009;76:3–4. (In Russ.)
10. Kosyrev N.A. Porosity as the indicator of change of engineering and geological conditions on the example of construction of buildings in the territory of JSC “KBKHA” of the Voronezh. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2012;(2):218–234. (In Russ.)
11. Zimnyukov V.A., Zborovskaya M.I. Taking into account the influence of moisture on the joint work of the backfill soil and the cell frame. *Proceedings of the Academy of Problems of Water Management Sciences. Issue 12. Actual problems of water management construction*. Moscow: MSU Publ.; 2018. p. 150–158. (In Russ.)
12. Belov V.V., Novichenkova T.B., Obratsov I.V. Capillary structurization of raw compositions on the basis of mineral binding substances. *Nanotechnology in construction*. 2010;(4):23–36. (In Russ.)
13. Becker A.T., Tsimbelman N.Ya., Chernova T.I. Determination of parameters and verification of the mathematical model of filled shells constructions on compressive foundation. *Proceeding of the VNIIG*. 2016;280:10–23. (In Russ.)
14. Program complex MIDAS GTS NX. Available from: <http://ru.midasuser.com/web/page.php?no=65> (accessed: 12.09.2020).
15. Li L., Aubertin M. Horizontal pressure on barricades for backfilled stopes. Part I. Fully drained conditions. *Can. Geotech. J.* 2009;46:37–46. <https://doi.org/10.1139/T08-104>
16. Li L., Aubertin M. Horizontal pressure on barricades for backfilled stopes. Part II. Submerged conditions. *Can. Geotech. J.* 2009;46:47–56. <https://doi.org/10.1139/T08-105>
17. Mkadmi N.E., Aubertin M., Li L. Effect of drainage and sequential filling on the behavior of backfill in mine stopes. *Can. Geotech. J.* 2014;51:1–15. <https://dx.doi.org/10.1139/cgj-2012-0462>
18. Shao L., Zhou X., Zeng H. Comparison of soil pressure calculating methods based on Terzaghi model in different standards. *The Open Civil Engineering Journal*. 2016;10(1):481–488. <https://doi.org/10.2174/1874149501610010481>
19. Lévesque Y., Saeidi A., Rouleau A. Estimating earth pressure exerted by the backfill on the vertical pillars in underground mine stopes. *GeoVancouver 2016*. Vancouver; 2016.