

3. СП 66.13330.2011. Проектирование и строительство напорных сетей водоснабжения и водоотведения с применением высокопрочных труб из чугуна с шаровидным графитом. С изменениями № 1. Изд. официальное, М., 2015.

4. СП 399.1325800.2018. Системы водоснабжения и канализации наружные из полимерных материалов. Правила проектирования и монтажа. С изменениями № 1.

5. Абрамов Н.Н. Водоснабжение: учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1974. 480 с.

6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическому сопротивлению фасонных и прямых частей трубопроводов. Жуковский: ЦАГИ, 1950.

7. Френкель Н.З. Гидравлика. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1947.

8. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П.Г. Киселева. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1972. 372 с.

#### REFERENCES

1. Grushin A.V., Gzhibovsky S.A., Kolomeets A.V. The relevance of the development of the greenhouse complex // Bulletin of Land Reclamation Science. 2024. No. 1. Pp. 62–66.

2. SP 40-102–2000. Design and Installation of Piping Systems for Water Supply and Sewerage Systems Made of Polymer Materials.

3. SP 66.13330.2011. Design and construction of pressurized water supply and sanitation networks using high-strength cast iron pipes with spherical graphite. With amendments No. 1. Official edition, Moscow, 2015.

4. SP 399.1325800.2018. Outdoor water supply and sewage systems made of polymer materials. Design and installation rules. With amendments No. 1.

5. Abramov N.N. Water Supply. Textbook for Higher Education Institutions. 2nd Edition, Revised and Expanded. Moscow, Stroyizdat, 1974. 480 p.

6. Idelchik I.E. Handbook on the Hydraulic Resistance of Shaped and Straight Parts of Pipelines, TsAGI, 1950.

7. Frenkel N.Z. Hydraulics, Gosenergoizdat, 1947.

8. Handbook of Hydraulic Calculations. Edited by P.G. Kiselev. 4th edition, revised and expanded. Moscow, Energiya, 1972. 372 p.

**Грушин Алексей Владимирович**, ст. науч. сотрудник отдела техники и технологий микроорошения, gav.vniiraduga@yandex.ru, SPIN-код: 8176-8525 AuthorID: 914880; **Колomeец Анастасия Валерьевна**, мл. науч. сотрудник отдела техники и технологий микроорошения, kolomeecz.n@bk.ru, SPIN-код: 1610-2385, AuthorID: 1046655 (ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», г. Коломна, Россия).

УДК 626.8

DOI: 10.32962/0235-2524-2026-1-4-7

## ИССЛЕДОВАНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕЛИОРАТИВНЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Х.А. АБДУЛМАЖИДОВ, В.И. БАЛАБАНОВ, И.В. БЕЛОВ, Н.В. ГАВРИЛОВСКАЯ

**Ключевые слова:** мелиоративные оросительные каналы, фильтрация в каналах, защитные покрытия каналов, дефекты бетонных покрытий, бетоны для ремонта каналов, прочность бетонов, марки бетонов

**Keywords:** reclamation irrigation canals, filtration in canals, protective coatings of canals, defects of concrete pavements, concretes for canal repair, strength of concrete, concrete grades

**Аннотация.** В статье представлены анализ состояния защитных бетонных покрытий оросительных каналов, способы восстановления нарушенных бетонных конструкций, результаты экспериментальных исследований бетонов для ремонта защитных покрытий оросительных каналов, рекомендации по видам и количеству добавок в бетонные смеси для улучшения их свойств при ремонте стыков бетонных конструкций. В процессе длительной эксплуатации мелиоративных оросительных каналов с защитными бетонными покрытиями в виде плит и экранов, наблюдается их разрушение под действием сил со стороны потока воды, волновых сил, льда в зимний период, а также собственного веса, в результате чего происходит трещины стыков, сползание плит, оголение и разрыв участков канала, приводящие к увеличению потерь воды с фильтрацией. В статье представлено исследование прочности бетонов с сульфоферритными добавками, основное назначение которых заключается в контролируемом расширении цементных растворов с компенсацией усадки, что важно для гидроизоляции и заделки трещин, с добавлением суперпластификатора на основе эфира поликарбоксилата с ускорителем набора прочности BASF MasterGlenium ACE 430.

**Abstract.** This article presents the analysis of the condition of protective concrete coatings of irrigation canals, methods of restoration of disturbed concrete structures, the results of experimental studies of concretes for the repair of protective coatings of irrigation canals, recommendations on the types and amount of additives to concrete mixtures to improve their properties when repairing joints of concrete structures. In the process of long-term operation of reclamation irrigation canals with protective concrete coatings in the form of slabs and screens, their destruction is observed under the influence of forces from the water flow, wave forces, ice in winter, as well as its own weight, as a result of which cracks occur in joints, sliding of slabs, exposure and erosion of sections of the canal, leading to an increase in water losses with filtration. The article presents a study of the strength of concretes with sulfiferitic additives, the main purpose of which is the controlled expansion of cement mortars with shrinkage compensation, which is important for waterproofing and crack sealing, with the addition of a polycarboxylate ester-based superplasticizer with a BASF MasterGlenium ACE 430 hardening accelerator.

**Введение.** Потери воды на фильтрацию в процессе ее транспортировки в каналах зоны орошения в земляном теле могут достигать значительных величин, что отражается негативно не только с точки зрения экологии, подтопления ближайших территорий, но и с экономической целесообразности. Для исключения таких потерь на предварительно уплотненных поверхностях дна и откосов оросительных каналов формируются защитные бетонные покрытия. Они могут быть сформированы в виде бетонных плит со стыковыми соединениями или в целом сформированы заливкой бетонной смеси в опалубку с армированными конструкциями в процессе строительства [1–4].

**Цель исследования.** Обоснование, выбор и определение прочности бетонных смесей с использованием сульфоферритных добавок и дифференцированного количества суперпластификатора на основе эфира поликарбоксилата с ускорителем набора прочности BASF MasterGlenium ACE 430.

**Материалы и методы исследования.** При длительной эксплуатации мелиоративных оросительных каналов с защитными покрытиями наблюдается их частичное разрушение, особенно соединительных стыков и швов бетонных плит. Кроме того, часто наблюдается сползание бетонных плит по откосу канала, при котором оголяется грунтовая подоснова, которая с течением времени размывается. Часто сползание бетонных плит возникает в результате разрушения конструкций бетонных оснований служащих упором для самой плиты. Такое состояние откосов и дна может привести к повышению фильтрации. Для обеспечения сохранности защитных экранов, связей бетонных плит

и в целом для поддержания нормальной работоспособности каналов необходимо обеспечить при ремонте каналов применение бетонных смесей с такими пропорциями компонентов и добавок к ним, которые усиливают и упрочняют соединительные швы и стыки.

В некоторых случаях необходимы добавки, предназначенные для расширения и увеличения в допустимых пределах объема затвердевающего бетона в целях ликвидации трещин в бетонных конструкциях, находящихся в контакте с водой [5–8]. Одной из таких добавок является сульфферритная смесь, в основе которой лежат сульфатосодержащие и железосодержащие отходы. В качестве основной характеристики данной добавки при рассмотрении бетонных смесей для ремонта защитных экранов оросительных каналов принимается возможность контролируемого расширения с учетом возможной усадки для гидроизоляции и заделки трещин. Сульфферритная добавка в рамках настоящей работы сформирована из гипса, содержащего сульфатированные и ферритовые компоненты.

Для оценки влияния на прочность бетонов кроме сульфферритных добавок в исследованиях применялся суперпластификатор на основе эфира поликарбоксилата с ускорителем набора прочности BASF MasterGlenium ACE 430 ускоряющий процесс гидратации и улучшающий набор ранней прочности бетона. Данная добавка обладает высоким водоредуцирующим действием.

Исследования проводились в лаборатории строительных материалов РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в период с октября по декабрь 2025 г. С учетом того, что кроме способности к расширению для исключения трещин, бетонные смеси для ремонта защитных покрытий оросительных каналов должны обладать достаточной прочностью, важной частью исследований являлось определение прочности бетонов с содержанием сульфферритных добавок и определение прочности в зависимости от возрастающего количества суперпластификатора на основе эфира поликарбоксилата с ускорителем набора прочности BASF MasterGlenium ACE 430. Для проведения лабораторных исследований, согласно стандартной методике, применялись следующие приборы, инструменты и материалы: образцы строительных материалов, испытательный лабораторный пресс ТП-1-1000, штангенциркуль, металлическая линейка, электронные весы [9–12].

Приготовление сульфферритной добавки производилось в лабораторных условиях перемешиванием измельченного сульфосодержащего гипса и железной стружки в пропорциях 50 и 50 % по массе.

В качестве базовой бетонной смеси применялась одна их распространенных марок М400, которая соответствует классу В30. Для приготовления требуемых порций бетонной смеси использовались следующие компоненты: портландцемент – 500 г, песок – 1090 г, щебень 1254 г, сульфферритная добавка 25 г, вода 235 мл. Данное соотношение определено на основе ГОСТ 26633. В процессе приготовления бетонной смеси соблюдалось водоцементное соотношение 27 %. Сульфферритная добавка использовалась в количестве 25 г в каждом опыте.

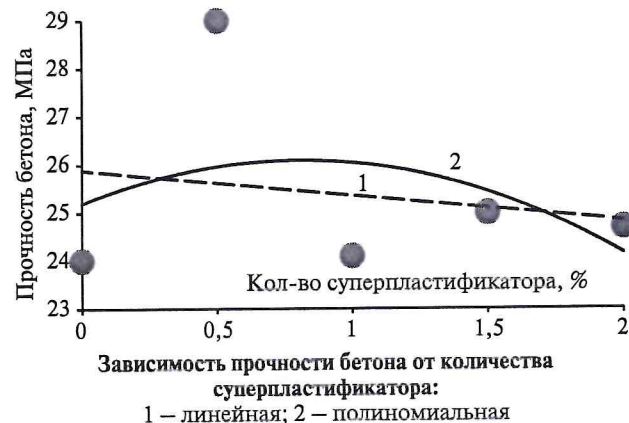
Исследование влияния добавки суперпластификатора на основе эфира поликарбоксилата с ускорителем набора прочности BASF MasterGlenium ACE 430 на прочность бетонной смеси марки М400 (В30) с содержанием 25 г сульфферритной составляющей, проводилось по схеме однофакторного эксперимента, в котором в качестве целевой функции принята прочность бетона, а в качестве фактора влияющего на прочность бетона – количество данной добавки в 0; 0,5; 1; 1,5; и 2 % от массы цемента. Соответственно для исследования прочности по каждому из представленных вариантов формировались по 3 бетонных кубика размерами 10×10×10 см. Трехкратное формирование кубиков проводилось для определения средних значений выборки. Для выяснения общего влияния добавки суперпластификатора ACE 430 на прочность бетона, кроме представленных вариантов, рассмотрен опыт с ее нулевым содержанием. Таким образом, для оценки влияния добавки – выбранного суперпластификатора ACE 430, в однофакторном эксперименте определены 5 точек.

С учетом требований по обеспечению полного затвердевания приготовленных образцов кубиков соблюдены сроки в 28 дней. Кроме того, в рамках исследований для выяснения динамики набора прочности данная характеристика по кубикам бетона М400 (В30) определена по истечению 7 суток. Прочность образцов на данном этапе затвердевания находилась в пределах от 12 до 15 МПа.

**Результаты исследования и их обсуждение.** По истечению 28 сут набора прочности бетонные кубики проверены на прочность в соответствии с требованиями ГОСТ 10180. Зависимость прочности бетона марки М400 (В30), содержащего сульфферритную составляющую, от количества суперпластификатора BASF MasterGlenium ACE 430, полученные в процессе обработки однофакторного эксперимента приведены на рисунке.

В таблице представлены результаты проведенных экспериментов в рамках однофакторного эксперимента по определению зависимости прочности бетона марки М400 (В30) с содержанием 25 г сульфферритной составляющей от количества добавленного в него суперпластификатора BASF MasterGlenium ACE 430.

Несмотря на невысокие значения коэффициентов детерминации  $R^2=0,0392$  для линейной и  $R^2=0,1346$  – для полиномиальной, которые показывают, насколько



## Определение прочности бетона в зависимости от количества добавки

Исследуемый бетон	Прочность			
	П <sub>1</sub> , МПа	П <sub>2</sub> , МПа	П <sub>3</sub> , МПа	П <sub>ср.</sub> , МПа
M400 (B30) + 0,0 %	22,7 (298,2)*	25,0 (328,7)	24,3 (319,4)	24,0 (315,4)
M400 (B30) + 0,5 %	29,8 (397,5)	28,4 (373,5)	29,0 (381,9)	29,0 (384,3)
M400 (B30) + 1,0 %	24,5 (322,6)	23,8 (313,0)	24,1 (317,3)	24,1 (317,6)
M400 (B30) + 1,5 %	24,5 (322,8)	25,2 (331,3)	25,3 (332,8)	25,0 (328,9)
M400 (B30) + 2,0 %	24,8 (326,7)	24,6 (323,3)	24,9 (328,0)	24,7 (326,0)

\* В скобках указана максимальная нагрузка, кН.

близко изменение случайной величины к строгой линейной или нелинейной зависимости, наиболее адекватно исследуемый процесс описывается полиномиальной аппроксимацией с уравнением регрессии:

$$y = -1,3714x^2 + 2,2229x + 25,194.$$

Результаты экспериментальных исследований показали, что в процессе формирования бетонных кубиков произошло увеличение их линейных размеров, величина которых находится в пределах 3...5 мм над стенками форм. Данная характеристика бетона, полученная добавлением сульфоферритной смеси подтверждается. Однако, по представленным зависимостям можно сделать выводы о том, что в данных конкретных условиях прочность бетона с добавлением суперпластификатора BASF MasterGlenium ACE 430 от 0,5 до 2 % незначительно, но снижается.

## Выводы

1. В работе проведен анализ состояния бетонных покрытий оросительных каналов. Выяснено, что в процессе длительной эксплуатации бетонные покрытия и защитные плиты подвергаются воздействию внешних условий, таких как давление воды, температурные перепады, волновые нагрузки и собственный вес, под которыми нарушаются первоначальные проектные формы и размеры канала. Такие виды дефектов увеличивают процесс фильтрации, приводящий к потере воды на мелиоративных оросительных системах.

2. По результатам проведенных экспериментов по определению прочности бетона марки M400 (B30) с содержанием сульфоферритной составляющей, в зависимости от количества добавленного суперпластификатора BASF MasterGlenium ACE 430, можно утверждать о возможности его применения для гидроизоляции и заделки трещин.

3. Установлено, что с точки зрения величины прочности бетона с добавлением суперпластификатора BASF MasterGlenium ACE 430 наблюдается незначительное ее снижение. Данный факт несколько ограничивает применение исследуемой марки бетона с добавлением перечисленных компонентов для ремонта ответственных бетонных покрытий оросительных каналов.

*Исследование выполнено в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Семененко С.Я., Марченко С.С., Дубенок Н.Н. Расчетное обоснование объема строительной смеси при устранении пустот под плитами крепления мелиоративных каналов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 6–1. С. 56–61.

2. Гарбуз А.Ю., Рыбалко Д.С. Обзор исследований берегозащитных устройств на гидротехнических сооружениях мелиоративного назначения // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. № 2(96). С. 15–34.

3. Байдакова Е.В., Кривоусова В.Н., Дунаев А.И. Проблемы возобновления работы и эксплуатации Северо-Крымского канала // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 5(93). С. 68–72. DOI 10.52691/2500-2651-2022-93-5-68-72.

4. Васильева Е.В., Федоров В.М. Повышение надежности бетонных элементов мелиоративных систем // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 4(64). С. 390–400. DOI 10.32786/2071-9485-2021-04-39.

5. Конструкционный легкий бетон для гидротехнического мелиоративного строительства / А.Р. Муратов, С.М. Меликузиев, О.Э. Атамуротов, А.Р. Эшбеков // Мелиорация и водное хозяйство. 2024. № 6. С. 34–40. DOI 10.32962/0235-2524-2024-6-34-40.

6. Васильева Е.В., Федоров В.М. Сборные элементы сооружений мелиоративных систем из бетона на некондиционных заполнителях // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т. 9, № 2. С. 33–42.

7. Инновационные способы восстановления микроразрушений гидротехнических сооружений / М.В. Карпов, Л.А. Журавлева, А.А. Жидкок [и др.] // Аграрный научный журнал. 2022. № 12. С. 77–81. DOI 10.28983/asj.y2022i12pp77-81.

8. Юрченко А.Н., Яо Ц. Общие подходы к восстановлению гидросооружений после длительного перерыва в строительстве // Мелиорация и водное хозяйство. 2024. № 5. С. 6–11. DOI 10.32962/0235-2524-2024-5-6-11.

9. Каддо М.Б., Филимонова Ю.С. Исследование модифицированного тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным полимерным модификатором // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29, № 1. С. 37–44.

10. Ткач Е.В., Филимонова Ю.С. Модифицированный тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего для гидромелиоративного строительства // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29, № 4. С. 326–334.

11. Фильтрация в каналах с земляным руслом и новые методы крепления откосов / Ф.К. Абдразаков, А.А. Рукавишников, О.В. Михеева, Е.Н. Миркина // Аграрный научный журнал. 2023. № 6. С. 107–114. DOI 10.28983/asj.y2023i6pp107-114.

12. Баев О.А. Изучение особенностей конструкций противофильтрационных экранов каналов и прудов-накопителей // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2014. № 3(15). С. 104–119.

## REFERENCES

1. Semenenko S.Ya., Marchenko S.S., Dubenok N.N. Mezhdunarodnoye zhurnal'nykh zhurnal'nykh issledovaniye [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2017. № 6-1. P. 56–61.
2. Garbuz A.Yu., Rybalko D.S. Ways to improve the efficiency of irrigated agriculture. 2025. № 2(96). P. 15–34.
3. Baydakova E.V., Krovopuskova V.N., Dunaev A.I. Problems of renewal of work and operation of the North Crimean Canal // Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy. 2022. № 5(93). P. 68–72. DOI 10.52691/2500-2651-2022-93-5-68-72.
4. Vasil'eva E.V., Fedorov V.M. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovaniye [Improving the reliability of concrete elements of reclamation systems]. 2021. № 4(64). P. 390–400. DOI 10.32786/2071-9485-2021-04-39.
5. Structural light concrete for hydrotechnical reclamation construction / A.R. Muratov, S.M. Melikuziev, O.E. Atamurotov, A.R. Eshbekov // Melioration and water management. 2024. № 6. P. 34–40. DOI 10.32962/0235-2524-2024-6-34-40.
6. Vasil'eva E.V., Fedorov V.M. Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii. 2023. T. 9, No 2. P. 33–42.
7. Karpov M.V., Zhuravleva L.A., Zhizdyuk A.A. [i dr.] [Innovative methods of restoration of microfractures of hydraulic structures]. 2022. № 12. P. 77–81. DOI 10.28983/asj.y2022i12pp77-81.
8. Yurchenko A.N., Ts. Yao General approaches to the restoration of hydraulic structures after a long break in construction. 2024. № 5. P. 6–11. DOI 10.32962/0235-2524-2024-5-6-11.

9. Caddo M.B. And investigation of modified concrete on the basis of polydispersent base with complex polymern urgerm modifier // Silicate technique and technology. 2022. Т. 29, № 1. S. 37–44.

10. Tkach E.V. Modified heavy concrete based on polydisperse binder for hydro-reclamation construction // Silicate technique and technology. 2022. Т. 29, № 4. S. 326–334.

11. Filtration in canals with an earth bed and new methods of slope fastening / F.K. Abdrazakov, A.A. Rukavishnikov, O.V. Mikhceva, E.N. Mirkina // Agrarian Scientific Journal. 2023. № 6. P. 107–114. DOI 10.28983/asj.y2023i6pp107-114.

12. Baev O.A. Study of the features of constructions of antifrillate screens of canals and ponds-accumulations. 2014. № 3(15). P. 104–119.

**Абдулмажидов Хамзат Арсланбекович**, доктор техн. наук, доцент, [abdulmajidov@rgau-msha.ru](mailto:abdulmajidov@rgau-msha.ru); **Балабанов Виктор Иванович**, доктор техн. наук, профессор, [vbabanov@rgau-msha.ru](mailto:vbabanov@rgau-msha.ru); **Белов Игорь Викторович**, аспирант, ст. преподаватель, [iv.belov@rgau-msha.ru](mailto:iv.belov@rgau-msha.ru); **Гавриловская Надежда Владимировна**, канд. техн. наук, доцент, [gavrilovskayanv@rgau-msha.ru](mailto:gavrilovskayanv@rgau-msha.ru) (РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия).

УДК 626-315.3

DOI: 10.32962/0235-2524-2026-1-7-11

## ВЕРИФИКАЦИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ОТКОСОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

В.В. СОРОКА, С.С. ТУРАПИН, А.Е. КАЧАЕВ

**Ключевые слова:** верификация, откос, коэффициент устойчивости, плотина, метод снижения прочности, метод конечных элементов

**Keywords:** verification, slope, stability factor, dam, strength reduction method, finite element method

**Аннотация.** В исследовании рассматриваются ключевые аспекты оценки устойчивости откосов, что является важной задачей в области геотехнической безопасности при проектировании инженерных сооружений. В работе акцентируется внимание на необходимость учета неопределенности и возможности переноса параметров на другие случаи, что требует строгого подхода к верификации моделей. Обзор включает анализ данных, полученных D.V. Griffiths и P.A. Lane, и подчеркивает различия между двумя стадиями верификации: корректностью расчетов и соответствием реальному режиму, что часто приводит к путанице в интерпретации результатов. Исследование выделяет преимущества применения метода конечных элементов, который позволяет гибко интегрировать численные методы и не требует предварительного знания механизма разрушения. В условиях растущей урбанизации и изменения климатических условий возрастает потребность в надежных методах прогнозирования устойчивости откосов. Выводы подчеркивают важность системного подхода к верификации и необходимости унифицированных наборов данных для калибровки и проверки моделей, что может значительно повысить надежность и точность в оценке устойчивости склонов. Расхождение между результатами численного моделирования откосов по параметру коэффициента устойчивости и перемещений и аналогичными параметрами, определяемыми по методу Morgenstern-Price не превышает 4%.

**Abstract.** This study examines key aspects of slope stability assessment, a critical issue in geotechnical safety design for engineering structures. It emphasizes the need to account for uncertainty and the transferability of parameters to other cases, which requires a rigorous approach to model verification. The review includes an analysis of data obtained by D.V. Griffiths and P.A. Lane and highlights the differences between two stages of verification: calculation accuracy and compliance with real-world conditions, which often leads to confusion in the interpretation of results. The study highlights the advantages of using the finite element method, which allows for the flexible integration of numerical methods and does not require prior knowledge of the failure mechanism. In the context of increasing urbanization and climate change, the need for reliable methods for predicting slope stability is increasing. The findings emphasize the importance of a systematic approach to verification and the need for unified datasets for model calibration and validation, which can significantly improve the reliability and accuracy of slope stability assessment. The discrepancy between the results of numerical modeling of slopes based on the stability and displacement coefficient parameter and similar parameters determined using the Morgenstern-Price method does not exceed 4%.

**Введение.** Устойчивость откосов является одной из ключевых задач геотехнической безопасности при проектировании инженерных сооружений и при оценке рисков, связанных с эксплуатацией природных склонов. Применение численных методов дает возможность учитывать нелинейную связность грунтов,

геомеханические свойства, запаздывания и различного рода внешние воздействия (нагрузки от грунтового давления, водонапор, сейсмические воздействия). Однако надежность таких оценок во многом определяется корректной верификацией численных моделей: совпадение решения с известными аналитическими результатами, с данными лабораторных и полевых испытаний и стабильная сходимости при изменении дискретизации и параметров моделирования [1, 2].

Для оценки прочности и устойчивости откосов применяют как аналитические методы (методы Феллениуса [3], Бишопа [4], которые предполагают форму скольжения в виде дуги круга; методы Спенсера [5], Джанбу [6], Моргенштерна-Прайса [7], Шахунянца [8], которые моделируют поверхность скольжения как ломаную линию), так и численные методы (например, метод конечных элементов – МКЭ [9, 10]), которые позволяют учитывать геомеханику материалов, геометрию откоса, неоднородности и нелинейность поведение грунтов. Однако надежная верификация численных моделей требует сопоставления результатов численного моделирования с известными аналитическими решениями или с эталонными тестами, особенно в случаях однородных откосов, где можно аппроксимировать поведение конечного элемента аналитическими формулами (например, для бесконечного откоса).

В статье рассматривается методологический подход к верификации устойчивости однородных откосов посредством численных моделей на основе конечных элементов и сопоставления с аналитическими решениями для бесконечного откоса, а также исследуются влияния параметров сетки, материала и граничных условий на получаемые значения фактора устойчивости объекта исследования.

Целью исследования является разработка методологии оперативной верификации и демонстрация ее применения на примере устойчивости различного устройства однородных откосов, оцениваемых численными методами с использованием современных моделей грунтов и методов аналитического расчета.

В последние годы на фоне роста темпов урбанизации, расширения инфраструктурных проектов и измене-