

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-6-593-612

УДК 624.138

EDN: DKACDV

Научная статья / Research article

Инъекционные технологии для устранения карстово-суффозионной опасности и просадочности грунтов в основании зданий и сооружений

И.Я. Харченко¹, А.И. Харченко², А.И. Панченко³, В.Т. Ерофеев³✉,
И.Т. Мирсаяпов⁴, В.Г. Хозин⁴, О.В. Тараканов⁵, Е.В. Завалишин⁶

¹ Российский университет транспорта, Москва, Россия

² ОАО «Россевзапстрой», Москва, Россия

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

⁴ Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Россия

⁵ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

⁶ Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия

✉ erofeevvt@bk.ru

Поступила в редакцию: 11 августа 2024 г.

Принята к публикации: 10 декабря 2024 г.

Харченко Игорь Яковлевич, советник РААСН, доктор технических наук, профессор кафедры мостов и тоннелей, Российский университет транспорта, Москва, Россия; eLIBRARY AuthorID: 815775, ORCID: 0009-0004-0521-9404; e-mail: iharcenko@mail.ru

Харченко Алексей Игоревич, кандидат технических наук, директор, ОАО «Россевзапстрой», Москва, Россия; ORCID: 0000-0002-3850-4285; e-mail: greenstone236@gmail.com

Панченко Александр Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 1223-1280, ORCID: 0009-0004-9538-6088; e-mail: alex250354@gmail.com

Ерофеев Владимир Трофимович, академик РААСН, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 4425-5045, ORCID: 0000-0001-8407-8144; e-mail: erofeevvt@bk.ru

Мирсаяпов Илизар Талгатович, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оснований фундаментов динамики сооружений и инженерной геологии, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 1454-1154, ORCID: 0000-0002-6193-0928; e-mail: mirsayapov1@mail.ru

Хозин Вадим Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 3825-6514, ORCID: 0000-0003-0874-316X; e-mail: khazin.vadim@yandex.ru

Тараканов Олег Вячеславович, доктор технических наук, профессор, декан факультета управления территориями, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 5316-5749, ORCID: 0000-0002-1773-6095; e-mail: tarov60@mail.ru

Завалишин Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной и компьютерной графики, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 8036-3974, ORCID: 0009-0003-6956-6010; e-mail: evaz@mail.ru

© Харченко И.Я., Харченко А.И., Панченко А.И., Ерофеев В.Т., Мирсаяпов И.Т., Хозин В.Г., Тараканов О.В., Завалишин Е.В., 2024



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

Аннотация. Показано, что устройство противофильтрационных завес (ПФЗ) с использованием различных буронагнеточных технологий следует рассматривать как наиболее эффективный метод по защите от развития карстово-суффозионной опасности при строительстве и эксплуатации транспортных и других сооружений. Для устройства ПФЗ и ликвидации карстовых разуплотнений, в зависимости от инженерно-геологических и гидрогеологических условий на участке будущего строительства, возможно применение различных смесей на основе полимеров, жидкого стекла и т.д. Показано, что полимерные пропиточные композиции эффективны для ускоренного варианта повышения несущей способности грунтов, а использование композиций на основе жидкого стекла позволяет повысить биостойкость. Эффективно также применение технологии струйной цементации, манжетной технологии или их комбинации. Специальные инъекционные смеси на минеральной основе целесообразно применять для уплотнения и упрочнения карстовых горных пород. Эти минеральные специальные инъекционные смеси более технологичны, а грунтобетон ПФЗ и уплотненных карстовых пород более долговечен по сравнению с грунтом, уплотненным инъекционными смесями на полимерной основе или на основе жидкого стекла. Эффективной инъекционной смесью для устройства ПФЗ при защите от карстово-суффозионной опасности является инъекционная смесь «ПФС+», которую следует рассматривать в качестве альтернативы инъекционным смесям на основе бентонита, полимеров или жидких стекол. Учитывая высокую вероятность развития сульфатной коррозии при инъектировании трещиноватых гипсовых пород, показана эффективность применения минерального тонкодисперсного вяжущего — микроцемента «Интроцем» на шлаковой основе в манжетной технологии. С целью ликвидации карстовых разуплотнений наиболее предпочтительным является применение специальной закладочной инъекционной смеси «ЗИС», которая изготавливается на основе минерального композиционного вяжущего. Опыт использования технологии «Super-Jet» при различных геотехнических условиях и проектных решениях показал, что прочность грунтобетонного массива, сформированного по данной технологии, может достигать 15 МПа, а при устройстве противофильтрационных завес обеспечивается их полная водонепроницаемость. Показано, что более высокая прочность грунтовых оснований достигается при их инъектировании порошково-активированными композициями.

Ключевые слова: инъекционные минеральные вяжущие, карстовые разуплотнения, противофильтрационные завесы

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы внесли равноценный вклад в разработку концепции и проведение исследования, рецензирование, редактирование и написание текста.

Для цитирования: Харченко И.Я., Харченко А.И., Панченко А.И., Ерофеев В.Т., Мирсаяпов И.Т., Хозин В.Г., Тараканов О.В., Завалишин Е.В. Инъекционные технологии для устранения карстово-суффозионной опасности и просадочности грунтов в основании зданий и сооружений // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2024. Т. 20. № 6. С. 593–612. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-6-593-612>

Injection Technologies for Elimination of Karst-Suffosion Hazard and Soil Subsidence in the Foundation of Buildings and Structures

Igor Ya. Kharchenko¹, Alexey I. Kharchenko², Alexander I. Panchenko³, Vladimir T. Erofeev³✉, Ilizar T. Mirsayapov⁴, Vadim G. Khozin⁴, Oleg V. Tarakanov⁵, Evgeny V. Zavalishin⁶

¹ Russian University of Transport, Moscow, Russia

² JSC “Rossevizapzastroy”, Moscow, Russia

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

⁴ Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russia

⁵ Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

⁶ N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

✉ erofeevvt@bk.ru

Received: August 11, 2024

Accepted: December 10, 2024

Abstract. It is shown that the installation of cutoff walls (CW) using various drilling and injection technologies should be considered as the most effective method to protect against the development of karst-suffosion hazard during construction and operation of transportation and other structures. Depending on geotechnical and hydrogeological conditions at the future construction site, it is possible to use various mixtures based on polymers, liquid glass, etc., for CW construction and elimination of karst unconsolidation. It is shown that polymeric impregnation compositions are effective for the accelerated option of increasing the bearing capacity of soils, and the use of compositions based on liquid glass allows to increase biologic

resistance. The use of jet grouting technology, collar technology or their combination is also effective. It is reasonable to use mineral-based special injection mixtures for compaction and hardening of karst rocks. These mineral-based special injection mixtures are more technologically advanced, and the soil cement of CW and compacted karst rocks is more durable compared to soil compacted with polymer-based or liquid glass injection mixtures. An effective injection mixture for CW installation for protection against karst-suffosion hazard is the “PFS+” injection mixture, which should be considered as an alternative to injection mixtures based on bentonite, polymers or liquid glass. Taking into account the high probability of sulfate corrosion development during injection of fractured gypsum rocks, the efficiency of application of mineral fine-dispersed binder — “Introcem” slag based microcement in collar technology — is shown. In order to eliminate karst unconsolidation, the most preferable approach is the use of the “ZIS” special injection mixture, which is made on the basis of mineral composite binder. The experience of using the “Super-Jet” technology under different geotechnical conditions and design solutions has shown that the strength of the soil cement body formed by this technology can reach 15 MPa, and the cutoff walls are fully waterproof. It is shown that higher strength of soil bases is achieved when they are injected with powder-activated compositions.

Keywords: mineral injection binders, karst unconsolidation, cutoff walls

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors’ contribution. All authors have made an equal contribution to conceptualization, review & editing, writing, review and editing.

For citation: Kharchenko I.Ya., Kharchenko A.I., Panchenko A.I., Erofeev V.T., Mirsayapov I.T., Khozin V.G., Tarakanov O.V., Zavalishin E.V. Injection technologies for elimination of karst-suffosion hazard and soil subsidence in the foundation of buildings and structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024;20(6):593–612. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-6-593-612>

1. Введение

Известно, что безопасная эксплуатация зданий и сооружений повышенной ответственности невозможна без рационального подхода к проектированию грунтового основания [1]. Среди множества негативных факторов, которые необходимо учитывать, важное место занимают карстово-суффозионные процессы. Устранение карстово-суффозионных процессов в мировой практике осуществляется с помощью различных мероприятий [2–4].

Значительная часть территории России, включая районы западного Приуралья, Русской равнины, Приангарья и многие другие районы Сибири, Кавказа и Дальнего Востока, находится в условиях развития карстово-суффозионной опасности [5–7]. В этой связи проектирование и строительство транспортных сооружений различного назначения, включая мостовые и дорожные сооружения, необходимо выполнять с учетом реализации соответствующих защитных мероприятий. Степень развития карстов определяется склонностью горных пород к растворению, гидрогеологическими условиями и геологическим строением участка, рельефом местности, степенью трещиноватости пород, климатическими условиями, а также другими природными и техногенными факторами [8–10]. Различают два вида

Igor Ya. Kharchenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Advisor of RAASN, Professor of Department of Bridges and Tunnels, Russian University of Transport, Moscow, Russia; eLIBRARY AuthorID: 815775, ORCID: 0009-0004-0521-9404; e-mail: iharchenko@mail.ru

Alexey I. Kharchenko, Candidate of Technical Sciences, Director, JSC “Rossevezapzastroy”, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0002-3850-4285; e-mail: greenstone236@gmail.com

Alexander I. Panchenko, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 1223-1280, ORCID: 0009-0004-9538-6088; e-mail: alex250354@gmail.com

Vladimir T. Erofeev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAASN, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 4425-5045, ORCID: 0000-0001-8407-8144; e-mail: rofeevvt@bk.ru

Ilizar T. Mirsayapov, Corresponding Member of RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Foundations of Structural Dynamics and Engineering Geology, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 1454-1154, ORCID: 0000-0002-6193-0928; e-mail: mirsayapov1@mail.ru

Vadim G. Khozin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 3825-6514, ORCID: 0000-0003-0874-316X; e-mail: khazin.vadim@yandex.ru

Oleg V. Tarakanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Territory Management, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 5316-5749, ORCID: 0000-0002-1773-6095; e-mail: tarov60@mail.ru

Evgeny V. Zavalishin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Engineering and Computer Graphics, N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 8036-3974, ORCID: 0009-0003-6956-6010; e-mail: evaz@mail.ru

суффозии — механическую и химическую. При механической суффозии фильтрующаяся вода размывает горные породы и перемещает глинистые, илистые или песчаные частицы во взвешенном состоянии по руслу подземных или надземных рек; при химической коррозии грунтовая вода растворяет горные породы (гипс, соли, карбонаты) вплоть до их полного исчезновения. При одновременном действии этих двух видов суффозии применяют термин — механохимическая суффозия [11–13]. Этот вид суффозии развивается в породах, где растворяется цементирующее вещество с одновременным выносом глинистых или иловых частиц.

Установлено, что наиболее интенсивному развитию подвержены горные породы, содержащие растворимые водой соли, гипс, известняки, доломиты и магнезиты. Одним из главных факторов, ускоряющих развитие карстовых процессов, является повышение интенсивности фильтрационных процессов при увеличении степени трещинообразования и обводненности горных пород [14; 15]. Наиболее интенсивно развиваются карстовые процессы в трещиноватых породах при наличии трещин шириной раскрытия более 1 мм, что обеспечивает интенсивную и свободную циркуляцию воды, сопровождающуюся преобразованием трещин в крупные каналы и пещеры. Этот процесс, получивший название коррозии, развивается до уровня естественного водоупора [16; 17]. При разработке и реализации мероприятий по защите транспортных сооружений в условиях карстово-суффозионной опасности (КСО) первоочередным является устройство противofильтрационных завес (ПФЗ), а также защитных экранов.

Способы уплотнения и упрочнения грунтов, применяемые для защиты от КСО, назначаются исходя из геотехнических задач, направленных на формирование противofильтрационных завес в структуре трещиноватых горных пород, а также для упрочнения грунта и ликвидации уже сформировавшихся карстовых полостей [18; 19]. В отдельных случаях достаточным и экономически обоснованным мероприятием является устройство защитных или разгружающих экранов, размещаемых между транспортным сооружением и сформировавшимися карстовыми породами [20; 21]. Кроме того, эффективным решением может быть устройство грунтобетонной опорной пяты для свайного фундамента, которая обеспечит необходимую несущую способность свай даже в случае развития карстово-суффозионных процессов в основании сооружения [10; 22; 23].

Геотехнические противокарстовые мероприятия осуществляются путем преобразования свойств грунтового массива в зоне фундаментов или в грунтах покрывающей толщи. Геотехнические мероприятия выполняются несколькими способами (или их комбинацией):

- ликвидация карстовых полостей по технологии струйной цементации, по манжетной или комбинированной технологии;
- инъекционное закрепление трещиноватых закарстованных пород по манжетной технологии восходящими заходками;
- закрепление грунтов покрывающей толщи по технологии струйной цементации, манжетной или комбинированной технологии.

Геотехнические противокарстовые мероприятия разделяют на два типа:

- мероприятия 1-го типа направлены на исключение условий образования, развития и проявления карста;
- мероприятия 2-го типа направлены на обеспечение прочности и устойчивости сооружения при возможном развитии карстовых процессов.

Геотехнические мероприятия типа 1 предполагают сплошное закрепление толщи карстовых пород в результате заполнения инъекционными смесями трещин и каналов в зоне трещиноватых грунтов. Геотехнические мероприятия типа 2 предполагают закрепление грунтов в толще над карстовыми породами, в основании сооружения, упрочнение поверхностных карстовых слоев или сочетание указанных мероприятий. В случае применения свайных фундаментов наиболее эффективным решением является устройство грунтобетонной опорной пяты в основании свай [24].

Исходя из имеющегося опыта и в зависимости от конструктивного исполнения фундаментов, особенностей инженерно-геологических условий площадки строительства, предполагаемого характера

развития карстовых процессов и т.д., цементация закарстованных пород (геотехнические мероприятия типа 1) и закрепление грунтов покровной толщи (геотехнические мероприятия типа 2) могут выполняться по площадной или локальной схемам.

Площадная схема предусматривает выполнение противокарстовых мероприятий в границах всего объекта или участка (а при необходимости — за его границами). Локальная схема предусматривает выполнение работ в границах отдельных участков или в отношении отдельных конструктивных элементов (например, цементация основания под пятой свай-стоек). При проектировании противокарстовых мероприятий по площадной схеме скважины рекомендуется располагать по сетке с регулярным шагом.

Далее приводятся некоторые результаты исследований и практического опыта упрочнения и уплотнения грунтов с применением инъекционных смесей на минеральной основе, позволяющие обоснованно определить область их эффективного применения при строительстве зданий и сооружений различного назначения в сложных инженерно-геологических условиях.

2. Инъекционные смеси для устройства противofiltrационных завес

Крупные пустоты характерны для массивов карбонатных или гипсоносных пород, пораженных карстовыми процессами, для выветрелых зон осадочных пород с глыбовым сложением, лавовых пород молодого геологического возраста. Отличительной особенностью являются не только большие размеры пустот, но и большая их неоднородность (особенно в закарстованных породах) по размеру и распространению в пространстве.

Для выявления формы и размеров крупных пустот должны предусматриваться разведочные скважины с документацией пустот, их размера, заполнителя; геофизические работы, проводимые путем электро- или сейсмоакустического профилирования и просвечивания, позволяющие установить области расположения крупных пустот.

Заполнение крупных пустот должно производиться способами заполнительной цементации.

В связи с невозможностью заранее определить объем пустот процесс производства цементационных работ рассчитывается на широкий диапазон изменения цементационных работ и состава вводимых материалов.

Технологические приемы заполнительной цементации зависят от ряда факторов: назначения цементации (прочности и водонепроницаемости заполнителя пустот); вида и формы цементационного сооружения; размера пустот; сообщаемости пустот; характера заполнителя в пустотах; обводненности и наличия подземных вод.

Для заполнения крупных пустот могут применяться растворы различных типов:

1. Цементно-песчаные растворы (с добавкой глины или бентонита).
2. Цементные растворы с добавкой искусственных пылеватых материалов (зола-уноса, каменной муки, молотого шлака).
3. Цементно-глинистые или цементно-суглинистые стабильные растворы с добавкой песка или без него).
4. Быстротсхватывающиеся смеси (БСС) или схватывающиеся и расширяющиеся растворы.

При укрепительной цементации непосредственно под сооружениями, при которой необходимо надежное заполнение пустот, целесообразно использовать растворы 1–3-го типов. При заполнении пустот в пределах противofiltrационной завесы следует применять растворы 3-го и 4-го типов. В качестве активных добавок используются жидкое стекло, алебастр, порошок алюминия (расширяющая добавка) и др.

Оборудование для цементации крупных пустот должно быть рассчитано на подачу густых растворов со значительным расходом. Нагнетание раствора в пустоты обычно производится без давления или с давлением, соответствующим потерям напора в коммуникациях. Появление давления в системе нагнетания и его рост обычно свидетельствуют об окончании заполнения пустот. При нагнетании

раствора через открытую скважину окончание заполнения пустот проявляется выходом раствора на поверхность. При нагнетании раствора в замкнутые пустоты пробуривается рядом с нагнетательной воздухоотводящая скважина, появление раствора в которой свидетельствует об окончании заполнения пустоты.

Для ограничения распространения по пустотам раствор следует нагнетать с перерывами. Возведение зданий на закарстованных породах представляет большие трудности и требует принятия специальных защитных мер. В практике строительства известны случаи, когда непринятие таких мер в условиях карста приводило к резкому увеличению фильтрации и даже к катастрофическим последствиям.

При наличии карста опасность представляет не только процесс выщелачивания карбонатных пород, но и механическая суффозия, затрагивающая в первую очередь отложения, накапливающиеся часто в карстовых полостях (песчаный, глинистый материал и др.). Вынос такого материала приводит к быстрому возрастанию фильтрации, что в свою очередь активизирует процесс карстообразования. В районах карста породы, слагающие основание зданий, должны быть особо тщательно исследованы. В закарстованных породах часто наблюдаются разветвленные фильтрационные ходы весьма большого протяжения, связывающие иногда с соседними долинами и реками.

При наличии в породах карстовых явлений разведочные скважины должны задаваться более близко одна от другой, чем обычно, так как в противном случае могут быть пропущены весьма важные данные о дефектах породы. Поэтому обычно принимаемые расстояния для разведочных скважин через 30–50 м по створу неприемлемы для районов карста.

При определенных условиях в районах карста возможно устройство мощных противofильтрационных завес и производство сплошной цементации основания под подошвой фундамента.

При проектировании и осуществлении завес в карстовых районах руководствуются следующими основными положениями:

1. При наличии карста опасные фильтрационные токи могут образоваться не только в плоскости или в непосредственной близости от проектируемых русловой и береговых завес, но также и под самим зданием или сооружением. В связи с этим наряду с проектированием завес должна быть установлена необходимость в принятии противofильтрационных мер в таких частях основания, где имеется угроза обходной фильтрации.

2. Отдельные крупные полости или карстовые пещеры, выявленные при разведочных работах, должны быть тщательно оконтурены на профилях. Они подлежат заполнению раствором или бетоном, глинистым материалом и т.п., для чего должен быть запроектирован в зависимости глубины залегания карстовых полостей тот или иной метод разработки — открытым способом или путем горных выработок. Особенно эффективным в этих случаях оказалось бурение скважин большого диаметра.

3. Опыт показал, что промытые каверны встречаются иногда на значительной глубине (при цементации пород зарегистрирован случай вскрытия больших каверн на глубине до 90 м). В связи с этим при глубоком залегании водоупорных пластов или при отсутствии признаков затухания трещиноватости с глубиной приходится в зависимости от местных условий проектировать завесы значительной глубины.

4. Завесы, как правило, проектируются двух- и трехрядными, а в особых случаях многорядными.

5. Расстояние между скважинами задается с учетом закарстованности пород в целях повышения качества цементации и во избежание пропуска каверн и трещин.

6. Направление цементационных скважин должно задаваться сообразно напластованию пород с учетом системы господствующих трещин. Положение отдельных крупных трещин необходимо при этом учитывать самостоятельно. При сложной трещиноватости пород для повышения цементации иногда задают систему пересекающихся скважин.

7. Помимо создания глубинной противofильтрационной завесы обычно предусматривают укрепление верхнего, наиболее выветрелого слоя пород путем цементации мелких скважин под верховой частью или под всей подошвой сооружения.

8. В проекте производства работ должны находить отражение характерные особенности цементации сильно нарушенных и закарстованных пород: недопустимость применения цементации методом восходящих зон, густых растворов и отощателей, бесциркуляционного (прямого) метода нагнетания, а в условиях очень сильной трещиноватости — прерывистого метода нагнетания.

Общим для всех этих способов требованием является последующая цементация прилегающих к карстовым полостям пород, в особенности в створе самой завесы.

Характерным для устройства завес в карстовых районах является их высокая стоимость и большой расход нагнетаемого материала. Поэтому особое значение приобретает выбор наиболее целесообразного для данных конкретных условий материала: цемента, песка, бентонита, битума, глины и т. п.

Экономические соображения должны приниматься во внимание при одновременном удовлетворении основного требования — долговечности завесы. Так, например, при выборе цемента должна быть обеспечена его коррозионная стойкость против воздействия подземных вод; при выборе глины суффозионная устойчивость завесы m условиях гидравлических градиентов, отвечающих проектному подпору. При выборе битума должно быть не только обеспечено надежное заполнение мелких трещин, но и предотвращена пластическая текучесть (выдавливание) битума из широких трещин при больших напорах.

Стремление к удовлетворительному разрешению этих сложных задач привело, в частности, к применению комбинированного метода создания завес, при котором используются совместно цементация и битумизация. При этом сначала битумизируются более тонкие трещины, а затем цементируются крупные каверны и трещины.

Начиная с 1920-х гг. в Советском Союзе использовались разнообразные способы закрепления грунтов с применением различных полимерных, битумных, жидкостекольных и минеральных составов.

Пропитка грунтов с целью их закрепления является широко применяемым технологическим процессом в области строительного производства. *Составы и свойства инъекционных смесей, предназначенных для уплотнения и упрочнения закарстованных пород, подбираются с учетом характера и степени их трещиноватости, а также гидрогеологических условий участка производства работ по результатам лабораторных исследований. Далее эти результаты уточняются в рамках выполнения опытно-производственных работ.*

Достижения современного материаловедения, внедрение новых способов строительства, появление современного бурового и инъекционного оборудования существенно повысили уровень технологичности и безопасности применяемых технологий инъектирования.

Уплотнение и упрочнение трещиноватой породы заключается в нагнетании под давлением через инъекционные скважины специальных смесей, которые после затвердевания формируют сплошной защитный экран в качестве ПФЗ, с заданной водонепроницаемостью, что исключает развитие процесса растворения горных пород и обеспечивает надежную эксплуатацию транспортного или иного сооружения.

В настоящее время применяемые полимерные системы преимущественно используются для устранения аварийных ситуаций при ликвидации активных водопроявлений, временной гидроизоляции, гидрофобизации конструкций и применяются в небольших объемах ввиду дороговизны составляющих материалов [25].

Для оперативного усиления оснований разработаны эффективные составы эпоксидных композитов с новыми отвердителями, а также составы композитов различной вязкости, регулируемой за счет введения растворителей и пластификаторов. В качестве отвердителей предложены полиоксиэтилированный триэтанолламин и смесь полиэтиленполиамин и кубовых остатков этилкарбитола. Данные отвердители менее активны, чем традиционные полиэтиленполиамины. Применение предложенных отвердителей позволяет повысить жизнеспособность пропиточных составов.

Результаты испытаний прочностных показателей составов с данными отвердителями приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Свойства эпоксидных композитов с новыми отвердителями /
Properties of epoxy composites with new hardeners

Состав, мас. ч. / Composition, pts. wt.	Отвердитель / Hardener	Содержание отвердителя, мас. ч. / Hardener content, pts. wt.	Прочность при сжатии, МПа / Compressive strength, MPa	Удельная ударная вязкость, кДж/м ² / Specific impact strength, kJ/m ²
Смола ЭД-20 – 100 / ED-20 resin – 100;	Полиоксиэтилированный триэтаноламин / Polyoxyethylated triethanolamine	10	96	5,0
Изопропиловый спирт – 10 / Isopropyl alcohol – 10;		15	107	5,42
Маршалит – 100 / Marshallit – 100;		20	106	5,36
Кварцевый песок – 250 / Quartz sand – 250		25	101	5,12
		30	95	4,75
Смола ЭД-20 – 100 / ED-20 resin – 100;	Смесь полиэтиленполиамин и кубовых остатков этилкарбитола / A mixture of polyethylene polyamine and still residues of ethylcarbitol	7,5	106	–
Портландцемент – 100 / Portland cement – 100;		10	109	
Кварцевый песок – 250 / Quartz sand – 250		15	92	
		20	85	

И с т о ч н и к: выполнено И.Я. Харченко, А.И. Харченко, А.И. Панченко, В.Т. Ерофеевым,

И.Т. Мирсаяповым, В.Г. Хозиным, О.В. Таракановым, Е.В. Завалишиным

S o u r c e: made by I.Ya. Kharchenko, A.I. Kharchenko, A.I. Panchenko, V.T. Erofeev,

I.T. Mirsayapov, V.G. Khozin, O.V. Tarakanov, E.V. Zavalishin

Высоконаполненные составы, приведенные в табл. 1, пригодны для усиления скальных оснований, в которых имеются трещины большого размера. В других случаях, а именно при трещинах малого размера, используются низковязкие ненаполненные составы.

Составы ненаполненных эпоксидных композиций оптимизированы нами по показателям упруго-прочностных характеристик. Оптимизационные исследования проводились с помощью плана эксперимента вида ПФЭ 2². Были приняты следующие факторы на уровнях варьирования (–1 +1): X_1 — количество отвердителя (9 и 12 мас. ч.), X_2 — количество добавки-разжижителя (10 и 20 мас. ч.). Количественные значения факторов приняты на 100 мас. ч. связующего.

Упруго-прочностные характеристики эпоксидных композиций определялись на образцах-балочках размером 20×20×70 мм. В качестве связующего использовали эпоксидную смолу марки ЭД-20, а в качестве отвердителя — полиэтиленполиамин. В качестве разжижающей добавки применяли бензин марки АИ-92. Композиции готовили совместным перемешиванием компонентов в миксере в течение 120 с. Порядок приготовления образцов из клеевых и пропиточных композиций был принят следующий: эпоксидное связующее перемешивали вначале с разжижающей добавкой, после чего в смесь вводили отвердитель (вязкость приготовленных композиций контролировали вискозиметром типа ВЗ-246 с диаметром воронки 5 мм). Полученные смеси укладывали в формы. Уплотнение образцов производили на встряхивающем столике при 30 ударах и частоте 1 удар в секунду. Образцы твердели в сушильном шкафу при температуре 80 °С в течение 6 ч.

После испытания образцов и статистической обработки результатов эксперимента получены следующие модели упруго-прочностных характеристик составов:

$$R_b^M = 52,16 + 16,22X_1 - 2,72X_2, \quad (1)$$

$$R_{bt}^M = 14,88 + 10,29X_1 - 3,17X_2, \quad (2)$$

$$E_0^M = 1892,8 + 379,7X_1 - 151,9X_2, \quad (3)$$

где R_b^M , R_{bt}^M и E_0^M — пределы прочности при сжатии, растяжении при изгибе и начальный модуль упругости матриц, МПа.

По уравнениям регрессии построены графические зависимости изменения свойств композитов от выбранных факторов и уровней их варьирования (рис. 1), из которых следует, что прочность эпоксидных композиций при сжатии и изгибе в пределах плана эксперимента изменяется соответственно в пределах 33,2–71,1 и 1,4–28,3 МПа, модуль упругости — 1 361–2 424 МПа, вязкость — 55–170 с.

На основе осуществленных исследований для проведения дальнейших опытов выбраны составы ненаполненных композиций различной вязкости, основные характеристики которых приведены в табл. 2.

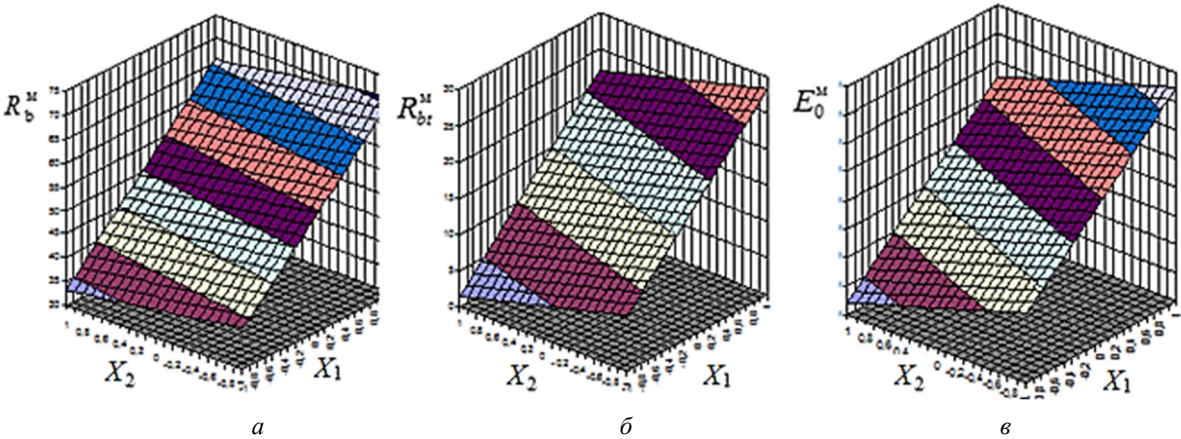


Рис. 1. Зависимости предела прочности при сжатии:

а — предела прочности при изгибе; б — начального модуля упругости;
в — ненаполненных эпоксидных композитов, МПа:

X_1 — содержание ПЭПА; X_2 — содержание бензина

И с т о ч н и к: выполнено И.Я. Харченко, А.И. Харченко, А.И. Панченко,
В.Т. Ерофеевым, И.Т. Мирсаяповым, В.Г. Хозиным, О.В. Тарakanовым, Е.В. Завалишиным

Figure 1. Compressive strength relationships:

а — bending strength; б — initial modulus of elasticity; в — unfilled epoxy composites, MPa:

X_1 is the content of PEPA, X_2 is the content of gasoline

S o u r c e: made by I.Ya. Kharchenko, A.I. Kharchenko, A.I. Panchenko,
V.T. Erofeev, I.T. Mirsayapov, V.G. Khozin, O.V. Tarakanov, E.V. Zavalishin

Таблица 2 / Table 2

Составы и основные характеристики пропиточных матриц /
Compositions and main characteristics of impregnation matrices

Обозначение композиций / Naming of compositions	Содержание в составах, мас. ч. / Content in the compositions, pts. wt.	Физико-механические показатели / Physical and mechanical parameters			
		R_b^M , МПа / МПа	R_{bt}^M , МПа / МПа	E_0^M , МПа / МПа	L_0^M , с / s
M1	ЭД-20 – 100 / ED-20 – 100 ПЭПА – 10 / PEPA – 10 бензин Аи-92 – 5 / AI-92 gasoline – 5	81,6	36,3	3030	159
M2	ЭД-20 – 100 / ED-20 – 100 ПЭПА – 10 / PEPA – 10 бензин Аи-92 – 7,5 / AI-92 gasoline – 7.5	74,8	36,0	2920	111
M3	ЭД-20 – 100 / ED-20 – 100 ПЭПА – 10 / PEPA – 10 бензин Аи-92 – 10 / AI-92 gasoline – 10	68,0	35,8	2750	69

И с т о ч н и к: выполнено И.Я. Харченко, А.И. Харченко, А.И. Панченко, В.Т. Ерофеевым,
И.Т. Мирсаяповым, В.Г. Хозиным, О.В. Тарakanовым, Е.В. Завалишиным

S o u r c e: made by I.Ya. Kharchenko, A.I. Kharchenko, A.I. Panchenko, V.T. Erofeev,
I.T. Mirsayapov, V.G. Khozin, O.V. Tarakanov, E.V. Zavalishin

В отдельных случаях требуется, чтобы инъекционные составы были способны отверждаться во влажных условиях, а также непосредственно в воде. С учетом полученных ранее данных нами была проведена оптимизация составов эпоксидных композитов на аминосланцефенольном отвердителе с применением различных пластификаторов (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Свойства эпоксидных композитов с различными пластификаторами /
Properties of epoxy composites with different plasticizers**

Характеристики / Specifications	Показатели составов на основе связующих / Parameters of compositions based on binders				
	ЭД-20 / ED-20	К-153 / K-153	К-115 / K-115	ЭКР-22 / EKR-22	ЭИС-1 / EIS-1
Предел прочности, МПа / Ultimate strength, MPa					
При сжатии / In compression	120,8	86,8	119,9	92,5	111,2
При изгибе / In bending	42,1	47,1	49,3	44,2	–
При растяжении / In tension	13,2	16,1	15,6	14,3	–
Модуль упругости, МПа / Modulus of elasticity, MPa	8227	5736	6569	4168	5553
Удельная ударная вязкость, кДж/м / Specific impact strength, kJ/m	4,9	7,3	8,1	6,5	–

И с т о ч н и к: выполнено И.Я. Харченко, А.И. Харченко, А.И. Панченко, В.Т. Ерофеевым,
И.Т. Мирсаяповым, В.Г. Хозиным, О.В. Таракановым, Е.В. Завалишиным

S o u r c e: made by I.Ya. Kharchenko, A.I. Kharchenko, A.I. Panchenko, V.T. Erofeev,
I.T. Mirsayapov, V.G. Khozin, O.V. Tarakanov, E.V. Zavalishin

Как видно из результатов исследования, эпоксидные композиты с введенными в их состав пластификаторами: К-115 (с олигоэфиром МГФ-9); К-153 (с олигоэфиром МГФ-9 и тиоколом); ЭКР-22 (с изомеризованной окситерпеновой смолой и окисленным скипидаром) — способствуют повышению прочности эпоксидных композитов при изгибе, растяжении и существенно повышают ударную прочность.

В последнее время становятся актуальными вопросы повышения биологической стойкости различных материалов [26; 27]. Обеспечение долговечной работы композитов на основе жидкого стекла невозможно без знания их работоспособности в средах, оптимизации структуры и составов материалов различного назначения. Следует отметить, что данные о биологической стойкости жидкостекольных композитов в литературе являются малочисленными. При проведении мероприятий, связанных с защитой зданий от биоповреждений, требуется разработка биоцидных пропиточных составов для снижения микробиологической зараженности грунтов, контактирующих с фундаментами и другими конструкциями зданий и сооружений.

В данном случае эффективными являются жидкостекольные композиты [27]. В отечественной и зарубежной практике наиболее применяемым отвердителем жидкого стекла является кремнефтористый натрий. Особенность кремнефтористого натрия заключается в том, что он не только взаимодействует со щелочью, понижая ее содержание, но и выделяет при разложении кремнекислоту, которая заметно уплотняет твердеющую систему, понижая пористость. К тому же известно, что он обладает и хорошим фунгицидным действием. Также известно, что при подкислении среды (уменьшении pH) развитие отдельных видов микроорганизмов прекращается. Учитывая это, можно предположить, что при выделении кремниевой кислоты среда становится более кислой, и это может оказать влияние на рост и размножение микроорганизмов на материале. Согласно литературным данным, оптимальная концентрация кремнефтористого натрия для получения плотных, водостойких и кислотостойких материалов составляет примерно 15 % от массы жидкого стекла. С целью проверки теоретических предположений о возможности повышения биостойкости жидкостекольных композитов за счет регулирования количественного содержания кремнефтористого натрия были проведены исследования составов,

в которых содержание кремнефтористого натрия варьировалось в пределах от 15 до 20 мас. ч. на 100 мас. ч. жидкого стекла. Результаты испытаний образцов на биостойкость приведены в табл. 4.

Анализ результатов испытаний показывает, что при увеличении содержания в составах композитов кремнефтористого натрия более 19 мас. ч. на 100 мас. ч. вяжущего жидкостекольные материалы становятся фунгицидными. Среди различных способов закрепления значительное место занимают методы силикатизации грунтов. С целью исследования поведения грунтов с пропитанной структурой и без проведения пропитки были проведены исследования образцов в стандартной биологической среде. При проведении исследований рассматривали песок фракций 0,14–0,315 и 0,63–1,25 мм. В качестве пропиточной композиции применяли жидкое стекло, которое смешивали с кремнефтористым натрием. Количество кремнефтористого натрия было принято равным 20 мас. ч. на 100 мас. ч. вяжущего. Пропитка грунтов осуществлялась следующим способом: песчаный грунт различной крупности пофракционно закладывался в формы размером 1×1×3 см и затем получившиеся образцы прямо в формах пропитывались жидкостекольными композициями. Пропитка осуществлялась без применения давления. Далее получившиеся образцы испытывали в средах микроскопических грибов. Результаты испытаний приведены в табл. 5.

Анализируя данные табл. 5, можно сделать вывод, что при пропитке песчаных грунтов жидкостекольными композициями образцы грунтов становятся фунгицидными.

Таблица 4 / Table 4

**Влияние кремнефтористого натрия на биостойкость жидкостекольных композитов /
The effect of sodium silicofluoride on the biological resistance of liquid glass composites**

Количество отвердителя, мас.ч. / Amount of hardener, pts. wt.	Оценка роста грибов, в баллах / Assessment of fungus growth, in points		Характеристика по ГОСТу / Characteristics according to GOST
	Метод 1 / Method 1	Метод 2 / Method 2	
15	0	2	Грибостоек / Fungus-resistant
16	0	2	Грибостоек / Fungus-resistant
17	0	2	Грибостоек / Fungus-resistant
18	0	2	Грибостоек / Fungus-resistant
19	0	1	Фунгициден / Fungicidal
20	0	0; R = 5	Фунгициден / Fungicidal

И с т о ч н и к: выполнено И.Я. Харченко, А.И. Харченко, А.И. Панченко, В.Т. Ерофеевым,
И.Т. Мирсаяповым, В.Г. Хозиным, О.В. Тарakanовым, Е.В. Завалишиным

S o u r c e: made by I.Ya. Kharchenko, A.I. Kharchenko, A.I. Panchenko, V.T. Erofeev,
I.T. Mirsayapov, V.G. Khozin, O.V. Tarakanov, E.V. Zavalishin

Таблица 5 / Table 5

**Влияние пропитки песчаных грунтов различного зернового состава на биостойкость /
The effect of impregnation of sandy soils of various grain composition on biological resistance**

Вид грунта / Type of soil	Оценка роста грибов, в баллах / Assessment of fungus growth, in points		Характеристика по ГОСТу / Characteristics according to GOST
	Метод 1 / Method 1	Метод 3 / Method 3	
Песок крупностью 0,63–1,25 мм / Sand with a grain size of 0.63–1.25 mm	0	0; R = 3	Фунгициден / Fungicidal
Песок крупностью 0,14–0,315 мм / Sand with a grain size of 0.14–0.315 mm	0	0; R = 15	–

И с т о ч н и к: выполнено И.Я. Харченко, А.И. Харченко, А.И. Панченко, В.Т. Ерофеевым,
И.Т. Мирсаяповым, В.Г. Хозиным, О.В. Тарakanовым, Е.В. Завалишиным

S o u r c e: made by I.Ya. Kharchenko, A.I. Kharchenko, A.I. Panchenko, V.T. Erofeev,
I.T. Mirsayapov, V.G. Khozin, O.V. Tarakanov, E.V. Zavalishin

Большая часть инъекционных работ (закрепление и консолидация грунта, создание противофильтрационных завес) в строительстве производится инъекционными смесями на минеральной основе ввиду их более низкой стоимости, достаточно высокой долговечности и технологичности, экологической безопасности и широкой доступности.

Эффективной инъекционной смесью для устройства ПФЗ при защите от КСО является инъекционная смесь «ПФС+», которую следует рассматривать в качестве альтернативы инъекционным смесям на основе бентонита, полимеров или жидких стекол. На основании выполненных исследований установлены прочностные (см. рис. 1) и реологические (рис. 2) характеристики «ПФС+», которые определяют эффективные области его применения. Из графиков (рис. 2) видно, что инъекционная смесь «ПФС+» является быстротвердеющей. На третьи сутки она набирает около 80–90 % прочности от прочности в возрасте 28 сут.

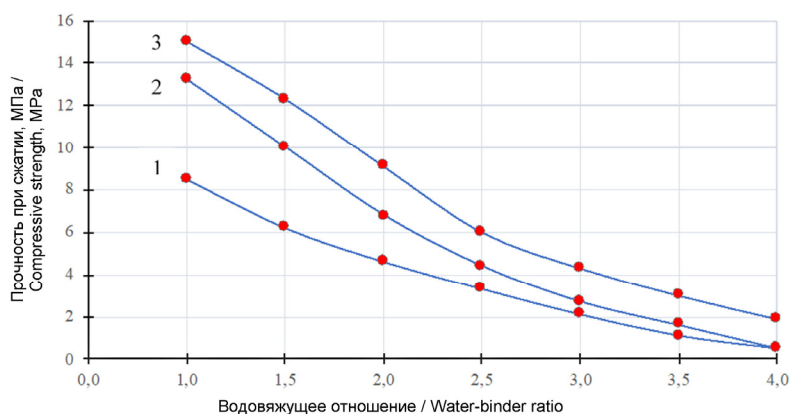


Рис. 2. Влияние водовязующего отношения на прочность при сжатии смеси «ПФС+», соответственно через 24 ч (1); 3 сут (2); 28 сут (3)
И с т о ч н и к: выполнено выполнено И.Я. Харченко, А.И. Харченко, А.И. Панченко, В.Т. Ерофеевым, И.Т. Мирсаяповым, В.Г. Хозиным, О.В. Таракановым, Е.В. Завалишиным

Figure 2. The effect of the water-binder ratio on the compressive strength of the “PFS+” mixture, respectively, after 24 hours (1); 3 days (2); 28 days (3)
S o u r c e: made by I.Ya. Kharchenko, A.I. Kharchenko, A.I. Panchenko, V.T. Erofeev, I.T. Mirsayapov, V.G. Khozin, O.V. Tarakanov, E.V. Zavalishin

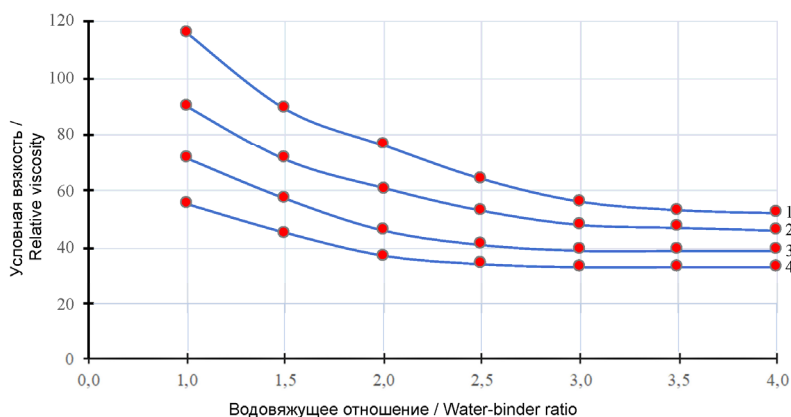


Рис. 3. Влияние водовязующего отношения на условную вязкость «ПФС+»: 1, 2, 3, 4 вязкость соответственно через 90 мин; 60 мин; 30 мин и после приготовления
И с т о ч н и к: выполнено И.Я. Харченко, А.И. Харченко, А.И. Панченко, В.Т. Ерофеевым, И.Т. Мирсаяповым, В.Г. Хозиным, О.В. Таракановым, Е.В. Завалишиным

Figure 3. The effect of the water-binder ratio on the relative viscosity of “PFS+”: 1, 2, 3, 4 viscosity, respectively, after 90 min; 60 min; 30 min and after preparation
S o u r c e: made by I.Ya. Kharchenko, A.I. Kharchenko, A.I. Panchenko, V.T. Erofeev, I.T. Mirsayapov, V.G. Khozin, O.V. Tarakanov, E.V. Zavalishin

При устройстве ПФЗ в трещиноватых породах и песчаных грунтах применяются растворы с водовязущим отношением В/В = 1,0...2,5, в зависимости от проектной прочности. На основании экспериментальных исследований установлено, что «ПФС+» с водовязущим отношением В/В = 2,5 и более обладает условной вязкостью по воронке Марша, сопоставимой с условной вязкостью воды (рис. 3).

Это обеспечивает ее равномерное распределение в структуре трещиноватых пород с последующим затвердеванием и надежной кольматацией трещин с шириной раскрытия до 0,5 мм. Этим обеспечивается практически полная водонепроницаемость трещиноватых пород, что исключает дальнейшее развитие суффозионных процессов и образование карстовых полостей в основании сооружений. Установлено улучшение физико-химических и физико-механических свойств цементных композитов от соотношения воды, цемента и возраста [28].

Инъекционная смесь на основе «ПФС+» может нагнетаться как с применением односторонних, так и двусторонних разжимных пакеров по манжетной технологии с целью формирования грунтобетонных массивов диаметром до 1,2 м и более в зависимости от вида грунта.

3. Инъекционные смеси для уплотнения и упрочнения песчаных грунтов и трещиноватых горных пород

В случае необходимости формирования ПФЗ в зоне песчаных грунтов и трещиноватых пород с шириной раскрытия трещин менее 0,5 мм используется инъекционное закрепление по манжетной технологии с применением особо тонкодисперсных минеральных, как правило, композиционных [29], вяжущих или микроцементов в режиме пропитки.

Большая часть инъекционных работ, связанных с уплотнением и упрочнением песчаных грунтов и трещиноватых горных пород в строительстве, производится также инъекционными смесями на минеральной основе ввиду их более низкой стоимости, достаточно высокой долговечности и технологичности, экологической безопасности и широкой доступности.

Инъекционная технология цементационного формирования грунтового массива основана на пропитке структуры грунта в режиме низконапорной подачи при малых давлениях (до 0,5 МПа). При этом в процессе нагнетания инъекционная смесь полностью заполняет поровую структуру грунта, кроме закрытых пор, без нарушения его природной структуры. При случаях, когда закрепляемый грунт находится в состоянии полного водонасыщения, инъекционная смесь в процессе пропитки вытесняет грунтовую воду, обеспечивая формирование грунтобетонного массива, по своим показателям сравнимого со строительными растворами и мелкозернистыми бетонами.

Инъекционные составы, используемые для пропитки, готовятся на водном растворе специальных минеральных вяжущих гидравлического типа твердения — ОТДВ, имеющих заданный химико-минералогический и гранулометрический состав. Такие показатели ОТДВ обеспечиваются при использовании специального технологического оборудования, включающего в себя:

- помольный комплекс (высокоскоростной диспергатор, дозирующий и смесительный блоки для производства ОТДВ);
- турбулентный смеситель и активатор готового инъекционного раствора;
- насосное оборудование с автоматической корректировкой давления и расхода в режиме инъектирования в соответствии с заданными проектными параметрами;
- манжетную технологию с использованием комплекта инъекторов труб и пакеров двухстороннего типа разжима.

Значительным резервом повышения технико-экономической эффективности работ по уплотнению и упрочнению грунтов по технологии струйной цементации является замена строительного портландцемента на шлаковое вяжущее [30]. Кроме того, целесообразность замены строительного портландцемента на шлаковое вяжущее обусловлена тем, что грунтовые воды в условиях плотной городской застройки обладают повышенной агрессивностью по отношению к цементным бетонам и,

наоборот, могут быть дополнительным активирующим фактором при применении шлаковых вяжущих. Теоретические основы применения активированных шлаков в строительстве изложены в трудах Г. Кюля, Я. Давидовича, В.Г. Глуховского [25; 26]. В частности, Я. Давидович ввел понятие геополимерных систем, основанных на щелочной активации метакеолина с образованием алюмосиликатных полимеров. В настоящее время исследованы и разработаны различные способы активации шлаков и зол, предусматривающих механическое, химическое или механохимическое воздействие на их структуру. Одним из эффективных способов активации доменных гранулированных шлаков является сульфатная активация, основанная на смешивании молотых шлаков и гипса.

Учитывая высокую вероятность развития сульфатной коррозии при инъектировании трещиноватых гипсовых пород, был применен микроцемент «Интроцем» на шлаковой основе и с использованием манжетной технологии. При этом весь расчетный объем инъекционной смеси после окончания процесса инъектирования размещался в капиллярно-пористой структуре грунта, обеспечивая ее уплотнение, упрочнение и полную водонепроницаемость. Инъектирование выполнялось при низком давлении до 8–10 бар, в режиме пропитки, с сохранением природной структуры грунта, что исключает вероятность каких-либо неконтролируемых потерь инъекционной смеси. Гарантируемое формирование сплошности грунтобетонного массива, а также достижение его проектных характеристик обеспечивается управляемым процессом инъектирования, при строгом соблюдении расчетных параметров технологического регламента.

Технология предусматривает формирование водонепроницаемого массива грунта с прочностью при сжатии не менее 2 МПа, глубиной пропитки до 1,2...1,8 м (рис. 4). Для обеспечения сплошности ПФЗ необходимо выполнять инъекцию структуры грунта в режиме пропитки с применением раствора низкой вязкости на основе особо тонкодисперсных минеральных вяжущих или микроцементов с дисперсностью не более $D_{95} < 6$ мкм. Инъекционная смесь приготавливалась с В/В = 1,5...2,5, с вязкостью по воронке Марша 32...34 с и седиментацией не более 5 %, со сроком загустевания после завершения инъекционных работ в период до 90 мин.

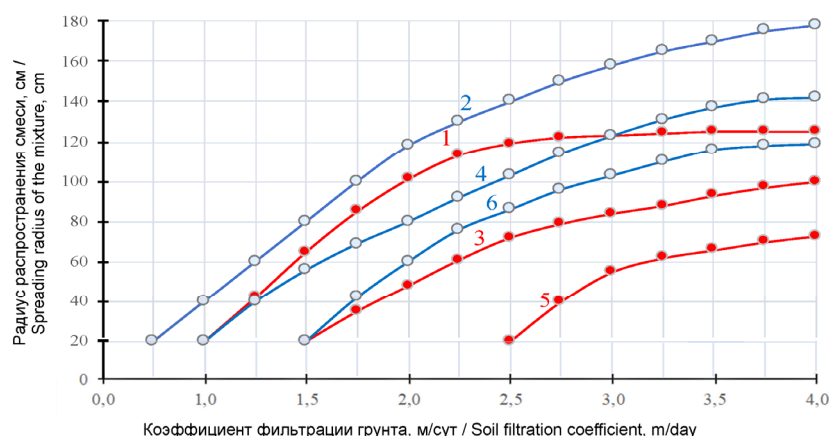


Рис. 4. Распределение инъекционной смеси «Интроцем» в структуре грунта в зависимости от его фильтрационной способности и дисперсности вяжущего:

1, 3, 5 — без предварительной обработки грунта; 2, 4, 6 — с предварительной обработкой грунта инъекцией воды с ПАВ; инъекционная смесь при В/В = 3,0; 1, 2 — Интроцем-экстра; 3, 4 — Интроцем-ультра; 5, 6 — Интроцем-стандарт

Источники: выполнено И.Я. Харченко, А.И. Харченко, А.И. Панченко, В.Т. Ерофеевым, И.Т. Мирсаповым, В.Г. Хозиным, О.В. Тарakanовым, Е.В. Завалишиным

Figure 4. Distribution of the “Introcem” injection mixture in the soil structure depending on its filtration capacity and binder fineness:

1, 3, 5 — no soil pretreatment; 2, 4, 6 — soil pretreatment by injection of water with surfactants; injection mixture at water-binder ratio = 3.0; 1, 2 — Introcem-extra; 3, 4 — Introcem-ultra; 5, 6 — Introcem-standard

Source: made by I.Ya. Kharchenko, A.I. Kharchenko, A.I. Panchenko, V.T. Erofeev, I.T. Mirsayapov, V.G. Khozin, O.V. Tarakanov, E.V. Zavalishin

«Интроцем» является экологически чистым продуктом, совместимым по минеральному составу с грунтом. В зависимости от дисперсности частиц, содержащихся в количестве 95 % от массы вяжущего, «Интроцем» классифицируется на три вида: «Интроцем-Экстра» при $D_{95} \leq 5,5$; «Интроцем-Ультра» при $D_{95} \leq 9,0$; «Интроцем-Стандарт» при $D_{95} \leq 15,5$.

На основании комплексных лабораторных исследований определены эффективные области применения инъекционных смесей на основе микроцемента «Интроцем», которые представлены в табл. 6.

Таблица 6 / Table 6

**Применение инъекционных смесей на основе микроцемента
«Интроцем» для устранения фильтрации воды через трещиноватые породы /
The use of injection mixtures based on Introcom microcement
to eliminate water filtration through fractured rocks**

Ширина раскрытия трещин, мм / Crack opening width, mm	Интроцем-Экстра / Introcom-Extra	Интроцем-Ультра / Introcom-Ultra	Интроцем-Стандарт / Introcom-Standard
0,1... 0,7 мм / mm	В/Ц / Water/cement = 1,0÷2,5 Рн / Strength $\leq 1,5$ МПа / MPa	Нет / No	Нет / No
0,8... 1,5 мм / mm	В/Ц / Water/cement = 1,0÷2,5 Рн / Strength $\leq 1,2$ МПа / MPa	В/Ц / Water/cement = 1,0÷2,5 Рн / Strength $\leq 1,2$ МПа / MPa	Нет / No
1,5... 3,0 мм / mm	Нет / No	Нет / No	В/Ц / Water/cement = 1,0÷2,5 Рн / Strength $\leq 1,0$ МПа / MPa

И с т о ч н и к: выполнено И.Я. Харченко, А.И. Харченко, А.И. Панченко, В.Т. Ерофеевым,
И.Т. Мирсаяповым, В.Г. Хозиным, О.В. Таракановым, Е.В. Завалишиным
S o u r c e: made by I.Ya. Kharchenko, A.I. Kharchenko, A.I. Panchenko, V.T. Erofeev,
I.T. Mirsayapov, V.G. Khozin, O.V. Tarakanov, E.V. Zavalishin

Эксплуатационные свойства шлакощелочных композиций можно улучшить за счет введения модифицирующих добавок [30].

Технологии однокомпонентной (Jet-1) и двухкомпонентной (Jet-2) цементации приемлемы для широкого спектра грунтов [31]. Они обеспечивают формирование свай диаметром 0,6–0,8 и 1,8–2,0 м соответственно. Однако в обоих случаях прочность грунтоцемента не превышает, как правило, 1–3 МПа. Кроме того, данные технологии не обеспечивают достаточную плотность и водонепроницаемость. Эффект достигается в случае применения комбинированных методов цементации.

Комбинация технологии двухкомпонентной струйной цементации (Jet-2) с манжетной инъекционной технологией цементации грунтов, получившей название «Super-Jet», имеет целью совместить высокую интенсивность производства работ, являющуюся существенным преимуществом двухкомпонентной струйной цементации, с необходимостью придать закрепляемому массиву повышенную прочность и непроницаемость, которая гарантированно достигается применением манжетной технологии с использованием инъекционных смесей на основе микроцементов.

Результаты полевых испытаний, а также опыт практического применения технологии «Super-Jet», при различных геотехнических условиях и проектных решениях, показал, что прочность грунтобетонного массива, сформированного по данной технологии, может достигать 15 МПа, а при устройстве противofильтрационных завес обеспечивается их полная водонепроницаемость. Причем усиленная таким образом противofильтрационная завеса может рассматриваться в качестве опорного элемента для различного вида фундаментов надземных конструкций.

4. Инъекционные смеси для ликвидации карстовых полостей

С целью ликвидации карстовых разуплотнений эффективным является применение специальной закладочной инъекционной смеси «ЗИС» (рис. 5), которая изготавливается на основе минерального композиционного вяжущего и имеет следующие отличительные свойства:

- инъекционная смесь легко перекачивается и сохраняет свою подвижность в период до 120 мин;
- после завершения инъекционных работ быстро загустевает и приобретает структурную прочность через 24 ч около 0,1...0,15 МПа;
- при твердении во влажных условиях в период до 6 мес. прочность увеличивается до 1,5...2,0 МПа и приобретает свойства тугопластичной глины.

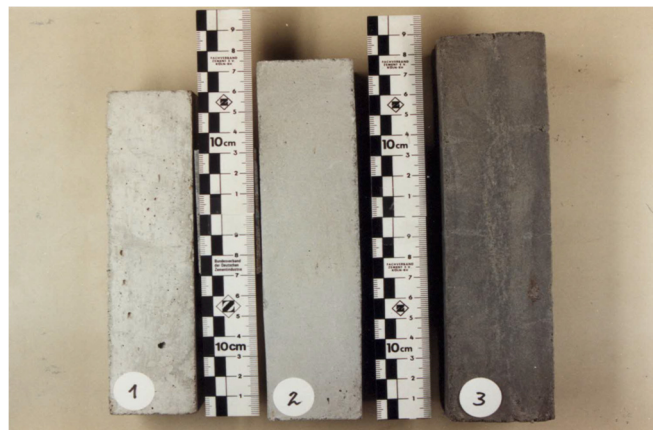


Рис. 5. Инъекционные смеси для ликвидации карстовых разуплотнений:

1 — инъекционная смесь на основе композиционного вяжущего без расширяющейся добавки с плотной структурой (ЗИС-П); 2 — инъекционная смесь на основе композиционного вяжущего с расширяющейся добавкой с плотной структурой (ЗИС-ПР). Объемное расширение 7–10 %; 3 — легкая инъекционная смесь на основе композиционного вяжущего с расширяющейся добавкой и мелкопористой структурой (ЗИС-ЛР). Объемное расширение до 15–20 %

И с т о ч н и к: выполнено И.Я. Харченко, А.И. Харченко, А.И. Панченко, В.Т. Ерофеевым, И.Т. Мирсаяповым, В.Г. Хозиным, О.В. Таракановым, Е.В. Завалишиным

Figure 5. Injection mixtures for the elimination of karst unconsolidation:

1 — injection mixture based on a composite binder without an expanding additive with a dense structure (ZIS-P);

2 — injection mixture based on a composite binder with an expanding additive with a dense structure (ZIS-PR). Volumetric expansion of 7–10%;

3 — light injection mixture based on a composite binder with an expanding additive and a fine-pored structure (ZIS-LR). Volumetric expansion up to 15–20%

S o u r c e: made by I.Ya. Kharchenko, A.I. Kharchenko, A.I. Panchenko, V.T. Erofeev, I.T. Mirsayapov, V.G. Khozin, O.V. Tarakanov, E.V. Zavalishin

Подбор состава инъекционной смеси «ЗИС» выполняется в лабораторных условиях в соответствии с проектными требованиями. В процессе производства работ определяются прочность, реологические параметры смеси, седиментационная устойчивость, величина усадки и расширения. Контроль соответствия фактического состояния заполненного карстового пространства проектным требованиям выполняется с применением методов прямого отбора проб и кернов, а также с применением геофизических и сейсмоакустических методов определения сплошности сформированного массива.

Для сплошного закрепления массива шаг скважин следует назначать исходя из условия взаимного пересечения зон закрепления смежных скважин на величину не менее 10 % расчетного радиуса закрепления. Нагнетание инъекционного раствора проводят непрерывно до наступления отказа, за который следует принимать либо полное прекращение поглощения раствора, либо снижение удельного расхода раствора до установленной проектом величины при проектном давлении отказа. При отсутствии особых требований в проекте за отказ в поглощении раствора рекомендуется принимать снижение расхода раствора до 2 л/мин при проектном давлении до 15 бар.

Для ликвидации карстовых разуплотнений и устройства противофильтрационных завес возможно применение смесей реакционно-порошковых бетонов с использованием микро- и нанодобавок и мелких песков.

Смеси готовятся на основе цемента с эффективными суперпластификаторами. Для повышения эффективности в состав смеси, в зависимости от расхода цемента, вводится один или несколько

микронаполнителей и микрокремнезем. В порошково-активированных смесях нового поколения к цементу добавляется до 100 % (от массы цемента) тонкомолотых порошков, полученных на основе плотных и прочных горных пород (гранит, диабаз, базальт). При использовании совместно с микронаполнителями микрокремнезема его частицы агрегируются на зернах цемента и микронаполнителя, создавая дополнительный объем реологически активной матрицы, что способствует снижению водопотребности смеси и уплотнению структуры.

При использовании тонкозернистых и молотых песков фракции $0,1\div0,5\div0,16\div0,63$ мм также увеличивается суммарный объем тонкодисперсной матрицы, которая служит для перемещения крупнозернистого песка и повышения пластичности смесей (табл. 7) [32].

Таблица 7 / Table 7

**Кинетика твердения реакционно-порошковых смесей с нанодобавками /
Kinetics of hardening of reaction powder mixtures with nano additives**

Состав / Composition	Расход материала на 1 м ³ (кг) / Material consumption per 1 m ³ (kg)	В/Ц / Water/Cement	$\rho_{\text{вал}}, \text{кг/м}^3 / \rho_{\text{wet}}, \text{kg/m}^3$	Прочность при сжатии $R_{\text{сж}}, \text{МПа} / \text{Compressive strength } R_{\text{comp}}, \text{MPa}$		
				1 сут / 1 day	7 сут / 7 days	28 сут / 26 days
Цемент белый М 500 / White cement M 500	658	0,38	2233	39,6	81,8	122
ГП Melflux 2651F 0,8 % от ПЦ / HP Melflux 2651F, 0.8% of PC	5,3					
Песок молотый $S_{\text{уд}} = 3200 \text{ см}^2/\text{г} / \text{Ground sand } S_{\text{sp}} = 3200 \text{ cm}^2/\text{g}$	272,4					
Микроволластонит $0,5\div97, \rho = 2,9 \text{ г/см}^3 / \text{Microwollastonite } 0.5\div97, \rho = 2.9 \text{ g/cm}^3$	58					
Песок немолотый Фр. $0,16\div0,63 / \text{Non-ground sand Fr. } 0.16\div0.63$	921					
Микрокремнезем / Silica	66					
Вода / Water	250					

И с т о ч н и к: выполнено И.Я. Харченко, А.И. Харченко, А.И. Панченко, В.Т. Ерофеевым, И.Т. Мирсаяповым, В.Г. Хозиным, О.В. Таракановым, Е.В. Завалишиным

S o u r c e: made by I.Ya. Kharchenko, A.I. Kharchenko, A.I. Panchenko, V.T. Erofeev, I.T. Mirsayapov, V.G. Khozin, O.V. Tarakanov, E.V. Zavalishin

Применение реакционно-активных песчаных литых бетонных смесей позволяет получать прочность до 40 МПа, а через 28 сут до 120 МПа. Кроме того, применение порошково-активированных бетонов способствует повышению показателей трещиностойкости.

5. Заключение

1. Безопасная эксплуатация оснований в сложных инженерно-геологических условиях невозможна без учета карстово-суффозионных процессов. Геотехнические противокарстовые мероприятия осуществляются путем преобразования свойств грунтового массива или устройства защитного экрана.

2. Рассматриваются инъекционные технологии для устранения карстово-суффозионной опасности и просадочности грунтов в основаниях зданий и сооружения. При этом для устройства противофильтрационных завес предлагаются технологии струйной цементизации, манжетной технологии, а также их комбинации.

3. Показано, что разработанные инъекционные смеси на минеральной основе являются высокотехнологичными, а грунтобетон с противофильтрационной завесой и уплотненных карстовых пород является более долговечным по сравнению с грунтом, уплотненными инъекционными смесями на полимерной и жидкостекольной основе, а также на основе бентонитов.

4. Показаны области эффективного использования полимерных и жидкостекольных пропиточных композиций. Первые рекомендуются для оперативного закрепления оснований, а вторые — для повы-

шения биостойкости грунтов. Экспериментально подобраны оптимальные составы полимерных и жидкостекольных композиций с различной вязкостью. Показано, что стоимость пропиточных составов на основе цементных вяжущих является более низкой.

5. Минеральные смеси на основе цементов являются быстротвердеющими, на третьи сутки они набирают около 80–90 % прочности от прочности в возрасте 28 сут. С их помощью обеспечивается практически полная водонепроницаемость трещиноватых пород, что исключает дальнейшее развитие суффозионных процессов и образование карстовых полостей в основании сооружений. Для случаев развития сульфатной коррозии показана эффективность применения микроцемента «Интроцем» на шлаковой основе при использовании в манжетной технологии.

6. Разработано три вида композиций «Интроцем», отличающихся дисперсностью наполнителя. Для ликвидации карстовых разуплотнений наиболее предпочтительным является инъекционная смесь «ЗИС», изготавливаемая на основе минерального композиционного вяжущего и сохраняющая свою подвижность в течение 120 мин.

7. Показана также эффективность 2-компонентной струйной цементации, получившей название «Super-Jet» позволяющей при необходимости прочность и непроницаемость. Опыт использования технологии «Super-Jet» с применением микроцементов при различных геотехнических условиях показал, что прочность грунтобетонного массива может достигать 15 МПа, а при устройстве противофильтрационных завес обеспечивает их полную водонепроницаемость.

8. Значительное повышение прочности грунтовых оснований достигается при их пропитке порошково-активированными композициями.

Список литературы

1. Тер-Мартirosян А.З., Соболев Е.С. Безопасность эксплуатации оснований зданий и сооружений при динамическом воздействии // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 5 (104). С. 537–544. <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.5.537-544>
2. Latypov A., Zharkova N., Ter-Martirosyan A. Calculation of the stress-strain state of soil massifs with karst-suffusion cavities // OP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. Article no. 042058. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/365/4/042058>
3. Glushkov A., Glushkov V., Glushkov I. Features of the construction of buildings in karst areas // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. Article no. 02043. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126302043>.
4. Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S., Grecheneva A.V., Mikhaleva E.V., Baknin M.D., Surzhik D.I. Application of phase-metric compensation method for geoelectric control of near-surface geodynamic processes // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2020. Vol. 9. No. 3. P. 898–905. <http://doi.org/10.11591/eei.v9i3.1727>
5. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. Москва : РУДН, 2017. 328 с. ISBN 978-5-209-07483-0
6. Аникеев А.В. Провалы и оседания земной поверхности в карстовых районах: моделирование и прогноз: дис. ... канд. геолого-минералогических наук. Москва, 2014. 142 с.
7. Кутепов В.М., Козлякова И.В., Анисимова Н.Г., Еремينا О.Н., Кожевникова И.А. Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупномасштабного геологического картирования г. Москвы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2011. № 3. С. 217–228. EDN: NUIKPN
8. Меркин В.Е., Маковский Л.В., Гарбер В.А. Проектирование и строительство тоннелей в закарстованных грунтах. Москва : ТИМР, 1994. Вып. 3. 61 с.
9. Рагозин А.Л., Елкин В.А. Региональная оценка карстовой опасности и риска // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2003. № 4. С. 33–52.
10. Родионов Н.В. Карст Европейской части СССР, Урала и Кавказа. Москва : Госгеолтехиздат, 1963. 174 с.
11. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. Москва : Изд-во ПНИИИС Госстроя России, 1995. 167 с.
12. Толмачев В.В. Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // Инженерная геология. 1980. № 3. С. 98–107. EDN: YKWQWZ
13. Толмачев В.В. О допустимых рисках строительства в карстовых районах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 5. С. 19–21. EDN: SLBANV
14. Толмачев В.В. Методы оценки карстовой опасности для строительных целей: состояние и перспективы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 4. С. 354–363. EDN: PFFQUD
15. Толмачев В.В., Роїтер Ф. Инженерное карстоведение. Москва : Недра, 1990. 152 с. ISBN: 5-247-01508-8

16. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. Москва : ГЕОС, 2003. 216 с. ISBN: 5-89118-320-X
17. Clayton C. Managing Geotechnical Risk: Improving productivity in UK building and construction. London, 2001. 80 p. <https://doi.org/10.1680/mgr.29675>
18. Robin F., Ho K., Lacasse S., Leroi E. A framework for landslide risk assessment and management. 2005. 786 p. <https://doi.org/10.1201/9781439833711-4>
19. Milanović P.T. Geological Engineering in Karst: dams, reservoirs, grouting, groundwater protection, water tapping, tunneling. Belgrade: Zebra, 2000. 347 p.
20. Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зайонц И.Л. Методика и результаты комплексного изучения карстово-суффозионных процессов в г. Москве // Инженерная геология. 1989. № 6. С. 77–94.
21. Tolmachev V., Leonenko M. Experience in collapse risk assessment of building on covered karst landscapes in Russia // Karst Management / ed. by van P. Beynen. Springer, Dordrecht, 2011. P. 75–102. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1207-2_4
22. Панченко А.И., Харченко И.Я., Алексеев С.В. Микроцементы. Москва : Издательство АСВ, 2014. 76 с. ISBN: 978-5-4323-0032-4
23. Ерофеев В.Т., Римшин В.И., Смирнов В.Ф. и др. Армированные каркасные композиты для зданий и сооружений. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2015. 360 с. ISBN 978-5-7103-3211-5
24. Erofeev V., Rodin A., Rodina N., Kalashnikov V., Erofeeva I. Biocidal Binders for the Concretes of Unerground Constructions // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. P. 1448–1454. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.878>
25. Erofeev V.T., Zavalishin E.V., Rimshin V.I., Kurbatov V.L., Stepanovich M.B. Frame composites based on soluble glass // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 2506–2517. EDN: WVBFTP
26. Maksimova I., Makridin N., Erofeev V., Barabanov D. Study of the Properties of Water-Hardened Cement Stone Depending on the Water-Cement Ratio and Age // Proceedings of IEEE 2020. ECE 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer, Cham, 2021. Vol. 150. P. 192–203. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_20
27. Panchenko A.I., Kharchenko I.Ya., Mirzozan M. Soil strengthening using fine composite binder based on carbide slurry // ICMTME 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 971. Article no. 032032. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/971/3/032032>
28. Aimenov Z.T., Aimenov A.J., Erofeev V.T., Sabitov L.S., Sanyagina Y.A. The effect of modifying additives on the performance properties of slag-alkali binders and concretes // International journal for computational civil and structural engineering. 2024. Vol. 20. No. 1. P. 162–170. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-1-162-170>
29. Харченко И.Я., Алексеев В.А., Исрафилов К.А., Бетербиев А.С.Э. Современные технологии цементационного закрепления грунтов // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 5 (104). С. 552–558. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.5.552-558>
30. Erofeev V., Bobryshev A., Lakhno A., Shafigullin L.N., Khalilov I., Sibgatullin K., Igtisamov R. Theoretical evaluation of rheological state of sand cement composite systems with polyoxyethylene additive using topological dynamics concept // Materials Science Forum. 2016. Vol. 871. P. 96–103. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.871.96>
31. Erofeev V.T., Vatin N.I., Maximova I.N., Tarakanov O.V., Sanyagina Y.A., Erofeeva I.V., Suzdaltsev O.V. Powder-activated concrete with a granular surface texture // International journal for computational civil and structural engineering. 2022. Vol. 18. No. 4. P. 49–61. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-4-49-61>
32. Travush V.I., Karpenko N.I., Erofeev V.T., Vatin N.I., Erofeeva I.V., Maksimova I.N., Kondrashchenko V.I., Kesarijskij A.G. Destruction of powder-activated concrete with fixation of destruction by a laser interferometer // Magazine of Civil Engineering. 2020. Vol. 95. Issue 3. P. 42–48. <https://doi.org/10.18720/MCE.95.4>

References

1. Ter-Martirosyan A.Z., Sobolev E.S. Operating safety of foundations of buildings and structures under dynamic impact. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2017;12(5):537–544. (In Russ.) <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.5.537-544>
2. Latypov A., Zharkova N., Ter-Martirosyan A. Calculation of the stress-strain state of soil massifs with karst-suffusion cavities. *OP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018;365:042058. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/365/4/042058>
3. Glushkov A., Glushkov V., Glushkov I. Features of the construction of buildings in karst areas. *E3S Web of Conferences*. 2021;263:02043. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126302043>
4. Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S., Grecheneva A.V., Mikhaleva E.V., Baknin M.D., Surzhik D.I. Application of phase-metric compensation method for geoelectric control of near-surface geodynamic processes. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2020;9(3):898–905. <http://doi.org/10.11591/eei.v9i3.1727>
5. Anikeev A.V. *Sinkholes and sinkholes in karst areas: formation mechanisms, prognosis and risk assessment*. Moscow: RUDN University, 2017. (In Russ.) ISBN 978-5-209-07483-0
6. Anikeev A.V. *Sinkholes and subsidence of the Earth's surface in karst areas: modeling and forecast*: diss. ... Candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Moscow, 2014. (In Russ.)

7. Kutepov V.M., Kozlyakova I.V., Anisimova N.G., Eremina O.N., Kozhevnikova I.A. Assessment of karst and karst-suffusion hazard in the project of large-scale geological mapping of moscow territory. *Geoecology. Engineering Geology, hydrogeology, geocryology*. 2011;(3):217–228. (In Russ.) EDN: NUIKPN
8. Merkin V.E., Makovskiy L.V., Garber V.A. *Design and construction of tunnels in karst soils*. Moscow: TIMR Publ.; 1994. (In Russ.)
9. Ragozin A.L., Elkin V.A. Regional assessment of karst hazard and risk. *Problems of safety and emergency situations*. 2003;(4):33–52. (In Russ.)
10. Rodionov N.V. *Karst of the European part of the USSR, the Urals and the Caucasus*. Moscow: Gosgeoltekhizdat Publ.; 1963. (In Russ.)
11. Savarensky I.A., Mironov N.A. *Guidelines for engineering and geological surveys in karst development areas*. Moscow: PNIIS Gosstroy of Russia Publ.; 1995. (In Russ.)
12. Tolmachev V.V. Probabilistic approach in assessing the sustainability of karst areas and designing anti-karst measures. *Engineering geology*. 1980;(3):98–107. (In Russ.) EDN: YKWQWZ
13. Tolmachev V.V. On the permissible risks of construction in karst areas. *Foundations, foundations and soil mechanics*. 2007;(5):19–21. (In Russ.) EDN: SLBANV
14. Tolmachev V.V. Methods for assessing karst hazards for construction purposes: state and prospects. *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*. 2012;(4):354–363. (In Russ.) EDN: PFFQUD
15. Tolmachev V.V., Reuter F. *Engineering karst science*. Moscow: Nedra Publ.; 1990. (In Russ.) ISBN: 5-247-01508-8
16. Khomenko V.P. *Patterns and forecast of suffusion processes*. Moscow: GEOS Publ.; 2003. (In Russ.) ISBN: 5-89118-320-X
17. Clayton C. *Managing Geotechnical Risk: Improving productivity in UK building and construction*. London, 2001. <https://doi.org/10.1680/mgr.29675>
18. Robin F., Ho K., Lacasse S., Leroi E. *A framework for landslide risk assessment and management*. 2005. <https://doi.org/10.1201/9781439833711-4>
19. Milanović P.T. *Geological Engineering in Karst: dams, reservoirs, grouting, groundwater protection, water tapping, tunneling*. Belgrade: Zebra Publ.; 2000.
20. Kochev A.D., Chertkov L.G., Zaionts I.L. Methodology and results of a comprehensive study of karst-suffusion processes in Moscow. *Engineering geology*. 1989;(6):77–94. (In Russ.)
21. Tolmachev V., Leonenko M. Experience in collapse risk assessment of building on covered karst landscapes in Russia. In: van P. Beynen (ed.). *Karst Management*. Springer, Dordrecht; 2011. p. 75–102. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1207-2_4
22. Panchenko A.I., Kharchenko I.Ya., Alekseev S.V. *Micro-cement*. Moscow: ASV Publ.; 2014. (In Russ.) ISBN: 978-5-4323-0032-4
23. Erofeev V.T., Rimshin V.I., Smirnov V.F. et al. *Reinforced frame composites for buildings and structures*. Saransk: Mordovian University Publ.; 2015. (In Russ.) ISBN 978-5-7103-3211-5
24. Erofeev V., Rodin A., Rodina N., Kalashnikov V., Erofeeva I. Biocidal Binders for the Concretes of Unerground Constructions. *Procedia Engineering*. 2016;165:1448–1454. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.878>
25. Erofeev V.T., Zavalishin E.V., Rimshin V.I., Kurbatov V.L., Stepanovich M.B. Frame composites based on soluble glass. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016;7(3):2506–2517. EDN: WVBBTP
26. Maksimova I., Makridin N., Erofeev V., Barabanov D. Study of the Properties of Water-Hardened Cement Stone Depending on the Water-Cement Ratio and Age. *Proceedings of IEEE 2020. EECE 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer, Cham, 2021;150:192–203. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_20
27. Panchenko A.I., Kharchenko I.Ya., Mirzozan M. Soil strengthening using fine composite binder based on carbide slurry. *ICMTMTE 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;971:032032. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/971/3/032032>
28. Aimenov Z.T., Aimenov A.J., Yerofeev V.T., Sabitov L.S., Sanyagina Y.A. The effect of modifying additives on the performance properties of slag-alkali binders and concretes. *International journal for computational civil and structural engineering*. 2024;20(1):162–170. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-1-162-170>
29. Kharchenko I.Ya., Alekseev V.A., Israfilov K.A., Beterbiev A.S.E. Modern technologies of cement grouting. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2017;5(104):552–558. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.5.552-558>
30. Erofeev V., Bobryshev A., Lakhno A., Shafigullin L.N., Khalilov I., Sibgatullin K., Igtisamov R. Theoretical evaluation of rheological state of sand cement composite systems with polyoxyethylene additive using topological dynamics concept. *Materials Science Forum*. 2016;871:96–103. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.871.96>
31. Erofeev V.T., Vatin N.I., Maximova I.N., Tarakanov O.V., Sanyagina Y.A., Erofeeva I.V., Suzdaltsev O.V. Powder-activated concrete with a granular surface texture. *International journal for computational civil and structural engineering*. 2022;18(4):49–61. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-4-49-61>
32. Travush V.I., Karpenko N.I., Erofeev V.T., Vatin N.I., Erofeeva I.V., Maksimova I.N., Kondrashchenko V.I., Kesarijskij A.G. Destruction of powder-activated concrete with fixation of destruction by a laser interferometer. *Magazine of Civil Engineering*. 2020;95(3):42–48. <https://doi.org/10.18720/MCE.95.4>