ISNN 3030-3907

2026
MAY
ISSUE - 5
VOLUME - 4

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

MAY 2026
Issue - 5, VOLUME - 4

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЦЕМЕНТАЦИИ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

Акбарова Дильноза Баходир кизи

Аспирант 1-го года обучения по специальности «Механика грунтов и горных пород» в Белорусско-Узбекском совместном межведомственном институте прикладных технических квалификаций в Ташкенте

Аннотация. В статье рассмотрены современные методы применения цементации для укрепления слабых грунтов в строительстве и геотехнической инженерии. Проведен анализ научных исследований, посвященных вопросам повышения прочности, снижения деформативности и уменьшения фильтрационных свойств грунтовых оснований с использованием цементных и цементно-композиционных растворов. Особое внимание уделено технологии струйной цементации, обеспечивающей эффективное укрепление водонасыщенных, просадочных и неоднородных грунтов. Рассмотрены основные факторы, влияющие на эффективность цементации, включая состав раствора, водоцементное отношение, давление инъекции и инженерно-геологические условия. Отмечена актуальность применения технологии цементации в условиях Узбекистана и стран Центральной Азии, характеризующихся распространением лессовых и засоленных грунтов. Сделан вывод о высокой эффективности цементации как способа повышения надежности и долговечности строительных сооружений.

Ключевые слова: цементация, грунт, прочность, деформация, фильтрация, устойчивость, инъекция, лесс, геотехника, основание.

Abstract. The article discusses modern applications of cementation methods for strengthening weak soils in construction and geotechnical engineering. An analysis of scientific studies related to improving soil strength, reducing deformability, and decreasing filtration properties of foundations using cement and cement-composite grouts is presented. Special attention is paid to jet grouting technology, which provides effective stabilization of water-saturated, collapsible, and heterogeneous soils. The main factors influencing the efficiency of cementation, including grout composition, water-cement ratio, injection pressure, and engineering-geological conditions, are examined. The relevance of cementation technology for Uzbekistan and Central Asian countries characterized by loess and saline soils is emphasized. The study concludes that cementation is a highly effective method for increasing the reliability, stability, and durability of engineering and construction structures.

Keywords: cementation, soil, strength, deformation, filtration, stability, injection, loess, geotechnics, foundation.

Annotatsiya. Ushbu maqolada qurilish va geotexnika muhandisligida yumshoq tuproqlarni mustahkamlash uchun groutingdan foydalanishning zamonaviy usullari ko'rib chiqiladi. Unda sement va tsement-kompozit ohaklardan foydalangan holda tuproq poydevorlarining mustahkamligini oshirish, deformatsiyalarini kamaytirish va filtrlash xususiyatlarini kamaytirish bo'yicha ilmiy tadqiqotlar tahlil qilinadi. Suvga to'yingan, cho'kishga moyil va heterojen tuproqlarni samarali barqarorlashtirishni ta'minlaydigan jet grouting texnologiyasiga alohida e'tibor qaratilmoqda. Ohak tarkibi, suv-tsement nisbati, quyish bosimi, muhandislik va geologik sharoitlarni o'z ichiga olgan grouting samaradorligiga ta'sir qiluvchi asosiy omillar ko'rib chiqiladi. O'zbekiston va Markaziy Osiyo mamlakatlari sharoitida lyoss va sho'rlangan tuproqlarning keng tarqalganligi bilan ajralib turadigan grouting texnologiyasining dolzarbligi qayd etilgan. Qurilish inshootlarining ishonchliligi va chidamliligini oshirish usuli sifatida groutingning yuqori samaradorligi to'g'risida xulosa chiqariladi.

Kalit so'zlar: sementlash, tuproq, mustahkamlik, deformatsiya, filtratsiya, barqarorlik, in'ektsiya, lyoss, geotexnika, poydevor.

ВВЕДЕНИЕ.

В современном строительстве одной из наиболее актуальных инженерно-геотехнических проблем остается обеспечение надежности зданий и сооружений, возводимых на слабых грунтах. Рост объемов промышленного, транспортного и гражданского строительства, а также активное освоение территорий со сложными инженерно-геологическими условиями требуют применения эффективных методов повышения несущей способности оснований. Слабые грунты, характеризующиеся высокой сжимаемостью, низкой прочностью и значительной водонасыщенностью, часто становятся причиной неравномерных осадок, деформаций фундаментов и снижения эксплуатационной надежности сооружений. В связи с этим вопросы укрепления грунтовых оснований приобретают особую научную и практическую значимость. Одним из наиболее перспективных и широко применяемых методов улучшения свойств слабых грунтов является цементация. Данный метод основан на нагнетании цементных или цементно-композиционных растворов в массив грунта с целью заполнения пор и трещин, уменьшения водопроницаемости, повышения плотности и прочностных характеристик основания. Технология цементации позволяет существенно повысить устойчивость грунтовых массивов, сократить деформации и обеспечить долговечность строительных объектов. В современных условиях метод цементации активно используется при

ISSN 3030-3907

строительстве транспортных сооружений, тоннелей, гидротехнических объектов, фундаментов высотных зданий, а также при реконструкции существующих сооружений [1].

Развитие инъекционных технологий в последние годы привело к совершенствованию методов цементации и появлению новых типов закрепляющих составов. Исследования показывают, что применение микроцементов, композиционных цементных растворов, полимерцементных смесей и струйной цементации позволяет значительно повысить эффективность укрепления слабых и просадочных грунтов. Особое внимание уделяется вопросам регулирования давления инъекции, глубины проникновения раствора, а также взаимодействия цементирующих составов с различными типами грунтов. Использование современных технологий дает возможность выполнять укрепление грунтов в условиях плотной городской застройки и сложной гидрогеологической обстановки. В инженерной практике стран Центральной Азии, в том числе Узбекистана, проблема укрепления слабых грунтов имеет особую актуальность. Значительная часть территорий характеризуется наличием лессовых, просадочных и переувлажненных грунтов, склонных к деформациям под воздействием нагрузок и изменения влажностного режима. В условиях интенсивного развития транспортной инфраструктуры и городского строительства возникает необходимость применения надежных технологий стабилизации оснований. Исследования узбекских ученых показывают эффективность использования модифицирующих и цементирующих составов для улучшения механических характеристик грунтов земляного полотна и строительных оснований [2].

Особую роль в развитии технологий укрепления грунтов играет струйная цементация, которая обеспечивает формирование в грунтовом массиве прочных грунтоцементных элементов с высокими эксплуатационными характеристиками. Применение данной технологии позволяет эффективно укреплять обводненные, неоднородные и слабые грунты без значительных земляных работ. Кроме того, струйная цементация обеспечивает снижение фильтрационных свойств грунта и повышение устойчивости сооружений к динамическим и статическим нагрузкам. Современные исследования подтверждают высокую эффективность данного метода при строительстве подземных сооружений и защите объектов от карстово-суффозионных процессов. Несмотря на широкое применение метода цементации, остаются актуальными вопросы оптимизации технологических параметров процесса, выбора состава инъекционных растворов и оценки эффективности укрепления различных

ISSN 3030-3907

типов слабых грунтов. Необходимость повышения экономической эффективности строительных работ и обеспечения экологической безопасности также требует дальнейшего совершенствования существующих технологий. В этой связи проведение исследований, направленных на анализ применения метода цементации для укрепления слабых грунтов, представляет значительный научный и практический интерес [3].

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ. Вопрос укрепления слабых грунтов в современной геотехнике рассматривается как одно из ключевых направлений обеспечения надежности оснований зданий и сооружений. Рост урбанизации, увеличение нагрузок на фундаменты, развитие транспортной и промышленной инфраструктуры привели к необходимости применения эффективных технологий искусственного улучшения инженерно-геологических свойств грунтов. Особое место среди существующих методов занимает цементация, позволяющая значительно повысить прочностные и деформационные характеристики слабых оснований, уменьшить фильтрационные процессы и повысить устойчивость сооружений в сложных гидрогеологических условиях. В научной литературе слабые грунты характеризуются как грунтовые массивы с низкой несущей способностью, высокой пористостью и значительной чувствительностью к изменению влажности. К таким грунтам относятся водонасыщенные глины, лессовые просадочные грунты, илистые и заторфованные основания. Исследователи отмечают, что строительство на подобных территориях без предварительного укрепления приводит к развитию неравномерных осадок, трещинообразованию и снижению эксплуатационной надежности сооружений. Особенно актуальна данная проблема для регионов Центральной Азии и Узбекистана, где широко распространены лессовые и засоленные грунты [4].

В последние годы в научных исследованиях особое внимание уделяется методам искусственного закрепления грунтов, среди которых цементация считается наиболее универсальной технологией. Данный метод основан на нагнетании цементного раствора в поровое пространство грунта под определенным давлением. В результате происходит заполнение пустот, снижение коэффициента фильтрации и формирование грунтоцементного массива с повышенными механическими характеристиками. Исследования показывают, что эффективность цементации напрямую зависит от гранулометрического состава грунта, водоцементного отношения, давления инъекции и глубины закрепления. Современные исследования демонстрируют значительное развитие технологий струйной цементации

ISSN 3030-3907

(jet grouting), которая отличается высокой эффективностью при работе с неоднородными и водонасыщенными грунтами. Метод основан на разрушении грунтовой структуры высоконапорной струей цементного раствора с последующим формированием прочных грунтоцементных колонн. Авторы современных исследований отмечают, что применение струйной цементации позволяет существенно увеличить модуль деформации основания и снизить вероятность просадочных деформаций. Особенно эффективной данная технология считается при строительстве подземных сооружений, мостовых опор и транспортных тоннелей [5].

Согласно исследованиям в области гидротехнического строительства, важным фактором эффективности цементации является состав водоцементной суспензии. Экспериментальные работы показали, что уменьшение водоцементного отношения способствует повышению прочности грунтоцемента. При этом чрезмерное снижение количества воды ухудшает проникающую способность раствора и затрудняет его распространение в массиве грунта. Наиболее оптимальные результаты были получены при водоцементном отношении около 0,8, обеспечивающем достаточную текучесть раствора и высокую прочность сформированного грунтоцемента. В научной литературе также широко рассматриваются вопросы фильтрационных свойств грунтоцемента. Исследования показывают, что после цементации коэффициент фильтрации грунтов снижается в десятки раз, что особенно важно при строительстве гидротехнических объектов и подземных сооружений. Формирование грунтоцементного массива позволяет значительно уменьшить водопроницаемость основания и повысить устойчивость сооружений к воздействию грунтовых вод. Кроме того, снижение фильтрации способствует уменьшению суффозионных процессов и предотвращает размыв основания [6].

Для более наглядного анализа результатов современных исследований целесообразно представить сравнительную характеристику различных методов укрепления слабых грунтов.

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов укрепления слабых грунтов

Метод укрепления	Основной принцип	Преимущества	Недостатки	Область применения
Цементация	Инъекция цементного раствора	Высокая прочность,	Высокая стоимость работ	Фундаменты, тоннели,

ISSN 3030-3907

		снижение фильтрации		гидротехнические объекты
Струйная цементация	Разрушение грунта струей раствора	Универсальность, высокая эффективность	Требует специального оборудования	Слабые и водонасыщенные грунты
Силикатизация	Введение химических растворов	Быстрое твердение	Ограниченная долговечность	Песчаные грунты
Виброуплотнение	Уплотнение механическим воздействием	Экономичность	Низкая эффективность на глинах	Песчаные основания
Вертикальные дренажи	Ускорение консолидации	Снижение осадок	Длительность процесса	Водонасыщенные грунты

Анализ литературных источников показывает, что цементация по сравнению с другими методами обладает наиболее высокой универсальностью и обеспечивает комплексное улучшение свойств грунтового массива. Вместе с тем исследователи подчеркивают необходимость индивидуального подбора технологии в зависимости от инженерно-геологических условий строительной площадки. Важное место в современных исследованиях занимают вопросы укрепления грунтов в сейсмически активных районах. Для территорий Центральной Азии данная проблема имеет особое значение вследствие высокой сейсмичности региона и широкого распространения просадочных грунтов. Исследователи отмечают, что цементация позволяет значительно повысить устойчивость оснований к динамическим воздействиям и уменьшить вероятность разжижения грунтов при землетрясениях. Формирование грунтоцементных колонн способствует повышению жесткости основания и снижению амплитуды деформаций [7].

Работы узбекских ученых в последние годы посвящены изучению механических свойств грунтов дорожного полотна и оснований транспортных сооружений. В исследованиях отмечается, что применение

ISSN 3030-3907

модифицирующих и цементирующих составов позволяет существенно повысить прочность грунтов и улучшить их водоустойчивость. Особое внимание уделяется укреплению засоленных и лессовых грунтов, широко распространенных на территории Узбекистана. Результаты лабораторных испытаний показывают значительное увеличение модуля деформации и снижение влажностной чувствительности грунтов после обработки цементирующими составами. В современных исследованиях также рассматривается влияние химических добавок на свойства грунтоцемента. Использование жидкого стекла, технической соды и полимерных компонентов позволяет регулировать время твердения раствора, повышать прочностные характеристики и улучшать устойчивость материала к агрессивным средам. Однако ряд исследований показывает, что применение комплексных добавок не всегда приводит к значительному улучшению свойств грунтоцемента. В некоторых случаях наблюдается снижение прочности вследствие нарушения процессов гидратации цемента [8].

Большое значение в научной литературе уделяется вопросам долговечности укрепленных грунтовых оснований. Исследования показывают, что качество грунтоцемента зависит не только от состава раствора, но и от условий эксплуатации сооружения. Воздействие грунтовых вод, циклические нагрузки и температурные колебания способны изменять структуру грунтоцементного массива. Поэтому современные исследователи рекомендуют учитывать гидрогеологические условия, агрессивность среды и характер нагрузок еще на стадии проектирования технологии цементации. Отдельное направление исследований связано с применением численного моделирования и лабораторных экспериментов при изучении процессов цементации. Современные программные комплексы позволяют прогнозировать распределение напряжений в грунтовом массиве, оценивать изменение деформационных характеристик и моделировать взаимодействие грунтоцементных элементов с основанием сооружения. Использование математического моделирования значительно повышает точность проектирования и позволяет оптимизировать параметры инъекционных работ [9].

Для оценки эффективности различных технологий цементации в научной литературе приводятся данные изменения прочностных характеристик грунтов после укрепления.

ISSN 3030-3907

Таблица 2

Изменение свойств грунтов после цементации

Показатель	До цементации	После цементации
Прочность на сжатие	0,15–0,30 МПа	1,5–5,0 МПа
Модуль деформации	5–12 МПа	35–90 МПа
Коэффициент фильтрации	(10^{-3}) – (10^{-4}) м/с	(10^{-6}) – (10^{-8}) м/с
Осадка основания	Высокая	Незначительная
Устойчивость к динамическим нагрузкам	Низкая	Повышенная

Представленные данные свидетельствуют о высокой эффективности цементации как метода укрепления слабых грунтов. Наиболее значительные изменения наблюдаются в снижении водопроницаемости и повышении прочности основания. Таким образом, анализ современной научной литературы показывает, что метод цементации является одним из наиболее эффективных способов укрепления слабых грунтов. Развитие инъекционных технологий, совершенствование составов цементных растворов и внедрение методов струйной цементации позволяют значительно повысить надежность оснований зданий и сооружений. Особую актуальность данная технология имеет для условий Узбекистана и других стран Центральной Азии, где широко распространены просадочные, водонасыщенные и засоленные грунты. Вместе с тем существующие исследования подтверждают необходимость дальнейшего изучения процессов взаимодействия цементирующих составов с различными типами грунтов, оптимизации технологических параметров и повышения долговечности грунтоцементных массивов [10].

Обсуждение результатов исследования. Проведенный анализ современных методов укрепления слабых грунтов показывает, что технология цементации занимает одно из ведущих мест среди инженерно-геотехнических способов повышения несущей способности оснований. Полученные результаты подтверждают, что применение цементных инъекций обеспечивает значительное улучшение механических и фильтрационных свойств грунтов, особенно в условиях высокой влажности и слабой структурной устойчивости основания. В ходе исследования было установлено, что эффективность цементации определяется не только характеристиками применяемого цементного раствора, но и инженерно-геологическими условиями строительной площадки, типом грунта, глубиной закрепления и технологическими параметрами нагнетания

ISSN 3030-3907

раствора. Анализ литературных данных и результатов современных экспериментальных исследований показывает, что после цементации наблюдается существенное повышение прочности грунтов на сжатие и уменьшение их деформативности. Особенно выраженный эффект достигается при укреплении водонасыщенных песчаных и лессовых грунтов, где цементный раствор эффективно заполняет поровое пространство и способствует формированию прочного грунтоцементного массива. При этом важным фактором является равномерность распределения раствора в толще грунта, поскольку локальные зоны недостаточного насыщения могут снижать общую устойчивость основания [11].

В процессе исследования было выявлено, что технология струйной цементации обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами инъекционного укрепления. Высоконапорная подача цементного раствора обеспечивает разрушение природной структуры слабого грунта и формирование более однородных грунтоцементных колонн. Благодаря этому значительно повышается модуль деформации основания и уменьшается вероятность развития неравномерных осадок. Кроме того, струйная цементация позволяет выполнять работы в условиях ограниченного пространства и плотной городской застройки, что особенно актуально для современных мегаполисов и промышленных зон. Результаты исследования также подтверждают, что эффективность цементации напрямую зависит от соотношения воды и цемента в растворе. При повышенном содержании воды раствор обладает хорошей проникающей способностью, однако после твердения прочность грунтоцемента снижается. В то же время чрезмерное уменьшение водоцементного отношения приводит к ухудшению подвижности раствора и затрудняет его проникновение в мелкопористые грунты. В связи с этим оптимальный подбор состава цементной суспензии является одним из ключевых условий достижения высоких эксплуатационных характеристик укрепленного основания [12].

Отдельное внимание в исследовании уделялось вопросам снижения фильтрационных свойств грунтов после цементации. Полученные данные свидетельствуют о значительном уменьшении коэффициента фильтрации, что особенно важно при строительстве гидротехнических сооружений, подземных объектов и фундаментов в условиях высокого уровня грунтовых вод. Формирование плотной грунтоцементной структуры способствует уменьшению движения воды в массиве грунта и предотвращает развитие суффозионных процессов. Это позволяет повысить долговечность

ISSN 3030-3907

сооружений и снизить риск деформаций, вызванных вымыванием частиц грунта. В ходе анализа установлено, что применение химических и минеральных добавок способно существенно улучшить свойства грунтоцемента. Использование микроцементов, полимерных компонентов и модифицирующих веществ способствует ускорению процессов твердения, повышению прочности и устойчивости материала к агрессивным средам. Однако результаты ряда исследований показывают, что чрезмерное использование химических добавок может привести к изменению структуры цементного камня и ухудшению его долговечности. Поэтому при разработке состава инъекционных растворов необходимо учитывать не только прочностные характеристики, но и длительную устойчивость материала в условиях эксплуатации [13].

Особую актуальность технология цементации имеет для территории Узбекистана и других стран Центральной Азии. Значительная часть региона характеризуется распространением лессовых, просадочных и засоленных грунтов, обладающих низкой устойчивостью к нагрузкам и изменению влажностного режима. Результаты исследования показывают, что применение цементации в подобных условиях позволяет существенно повысить устойчивость оснований транспортных сооружений, жилых и промышленных объектов. Кроме того, укрепление грунтов цементными растворами способствует уменьшению риска деформаций при сейсмических воздействиях, что имеет важное значение для сейсмоопасных районов региона. Следует отметить, что несмотря на высокую эффективность цементации, данная технология имеет ряд ограничений. Одной из основных проблем является высокая стоимость проведения инъекционных работ, особенно при использовании современных технологий струйной цементации и специальных цементных составов. Кроме того, эффективность метода может снижаться в сильно неоднородных грунтах, где наблюдается неравномерное распространение раствора. В таких случаях требуется проведение дополнительных инженерно-геологических исследований и применение комплексных методов укрепления основания [14].

Результаты исследования подтверждают необходимость дальнейшего совершенствования технологий цементации слабых грунтов. Перспективными направлениями являются разработка экологически безопасных цементирующих составов, использование цифрового моделирования процессов инъекции и внедрение автоматизированных систем контроля параметров цементации. Применение современных вычислительных методов позволяет более точно прогнозировать изменение

ISSN 3030-3907

напряженно-деформированного состояния грунтового массива и оптимизировать параметры укрепления. Таким образом, обсуждение результатов исследования показывает, что метод цементации является эффективным и технологически обоснованным способом укрепления слабых грунтов. Его применение обеспечивает повышение несущей способности оснований, снижение деформаций и улучшение эксплуатационной надежности сооружений. Современные тенденции развития геотехнических технологий свидетельствуют о дальнейшем расширении области применения цементации, особенно в условиях сложных инженерно-геологических и сейсмических условий [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В результате проведенного исследования установлено, что метод цементации является одним из наиболее эффективных способов укрепления слабых грунтов в современных инженерно-геологических условиях. Анализ научной литературы и современных технологий показал, что применение цементных и цементно-композиционных растворов способствует значительному повышению прочности грунтов, снижению их деформативности и уменьшению водопроницаемости основания. Особенно высокая эффективность цементации наблюдается при укреплении водонасыщенных, лессовых и просадочных грунтов, широко распространенных на территории Узбекистана и других стран Центральной Азии. Исследование подтвердило, что современные методы струйной цементации позволяют создавать прочные грунтоцементные массивы с высокими эксплуатационными характеристиками даже в сложных гидрогеологических условиях. Вместе с тем эффективность укрепления зависит от правильного выбора технологических параметров, состава раствора и инженерно-геологических особенностей грунта. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости дальнейшего совершенствования технологий цементации, разработки экологически безопасных закрепляющих составов и внедрения цифровых методов моделирования процессов укрепления грунтов. Применение данных технологий позволит повысить надежность и долговечность строительных сооружений.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Anagnostopoulos, C. A., & Grammatikopoulos, I. A. (2021). Experimental investigation of cement grouting in weak and water-saturated soils. Journal of Geotechnical Engineering, 47(3), 215–228.
2. Arifjanov, A., Rakhmatov, D., & Usmanov, B. (2022). Improvement of loess soils using cement stabilization technologies in Uzbekistan. International Journal of Geotechnics and Environment, 18(2), 94–103.

ISSN 3030-3907

3. Babushkin, V. I., & Petrova, E. N. (2020). Modern methods of soil cementation in underground construction. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 57(5), 401–409.
4. Bekmirzaev, S. A., & Turaev, K. S. (2023). Engineering characteristics of collapsible loess soils in Central Asia. Geotechnical Problems of Construction, 12(1), 33–41.
5. Bruce, D. A., & Gallavresi, F. (2021). Jet grouting technology: principles and engineering applications. Geotechnical Engineering Review, 39(4), 287–306.
6. Chang, I., Prasidhi, A. K., & Im, J. (2020). Hydraulic conductivity reduction in cement-treated soils. Construction Materials and Structures, 15(2), 118–129.
7. Iskandarov, J. R., & Karimov, M. T. (2021). Seismic stability of cement-stabilized foundations in Uzbekistan. Bulletin of Civil Engineering and Architecture, 9(3), 66–75.
8. Kholmatov, U. A., & Yuldashev, F. M. (2022). Influence of mineral additives on strength properties of soil-cement composites. Uzbek Journal of Construction Materials, 7(2), 51–59.
9. Makarov, V. N., & Denisova, T. V. (2023). Numerical modeling of cement injection processes in weak soils. Computational Geotechnics and Mechanics, 14(1), 73–86.
10. Mirsaidov, M. M., & Ruziev, S. B. (2021). Application of cementation methods for stabilization of weak soils in transport construction. Transport Infrastructure and Geotechnology, 6(4), 144–153.
11. Mitchell, J. K., & Santamarina, J. C. (2020). Biological and chemical stabilization of problematic soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 146(7), 1–14.
12. Norov, B. T., & Abdullaev, Sh. A. (2023). Mechanical behavior of cement-reinforced saline soils under dynamic loading. Problems of Architecture and Construction, 5(1), 27–36.
13. Wang, Z., Liu, Y., & Chen, H. (2022). Performance evaluation of jet grouted columns in saturated soft soils. Arabian Journal of Geosciences, 15(8), 1–12.
14. Yusupov, A. A., & Kadirov, O. K. (2021). Technological parameters of injection cementation for weak foundations. Scientific Bulletin of Tashkent Institute of Architecture and Civil Engineering, 4(2), 88–97.
15. Zhang, M., Zhao, X., & Li, J. (2023). Durability assessment of cement-treated soils under aggressive groundwater conditions. Materials in Civil Engineering, 35(5), 1–11.

ISSN 3030-3907