ISNN 3030-3907

2026
MAY
ISSUE - 5
VOLUME -12

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

MAY 2026
Issue - 5, VOLUME – 12

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

УДК 69.059.32:72.025.4:624.138

ИНЪЕКЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УКРЕПЛЕНИИ КОНСТРУКЦИЙ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ: ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО АДАПТАЦИИ ДЛЯ ИСТОРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ БУХАРЫ И УЗБЕКИСТАНА

Файзуллаева З.Н.

Бухарский государственный технический университет, г. Бухара, Узбекистан

E-mail:zfayzullayeva@bstu.uz

Аннотация. В статье рассматриваются современные инъекционные технологии, применяемые для укрепления несущих конструкций памятников архитектуры. На основе анализа зарубежного опыта, прежде всего египетской практики реставрации исторических зданий Каира (мечеть Соргутамеш, церковь Абу-Серга, мечеть Ибн Тулуна), систематизированы ключевые методы: цементационное нагнетание, химические и эпоксидные инъекции, струйная цементация (Jet Grouting). Проведён анализ геотехнических расчётных моделей, применяемых при оценке несущей способности основания до и после укрепления. Обоснована возможность адаптации перечисленных технологий для объектов исторической застройки Бухары и Узбекистана с учётом местных инженерно-геологических условий, климатических особенностей и специфики традиционного строительного материала (пахса, жжёный кирпич, ганч). Результаты исследования могут быть использованы при разработке национальных норм реставрации объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО.

Ключевые слова: инъекционные технологии, геотехника, памятники архитектуры, реставрация, цементационное нагнетание, Jet Grouting, Бухара, Египет, несущая способность основания, исторические здания.

Abstract. This article examines contemporary grouting technologies used for strengthening load-bearing structures of architectural heritage monuments. Based on an analysis of international experience, primarily Egyptian practice in restoring historical buildings in Cairo (Sarghatmish Mosque, Abu Serga Church, Ibn Tulun Mosque), the key methods are systematized: cement grouting, chemical and epoxy injection, and Jet Grouting. Geotechnical calculation models used to assess bearing capacity before and after consolidation are analyzed. The feasibility of adapting these technologies to the historical buildings of Bukhara and Uzbekistan is substantiated, taking into account local engineering-geological conditions, climatic characteristics, and the specific properties of traditional building materials (pakhsa, fired brick, ganj). The findings can serve as the basis for developing national restoration standards for UNESCO World Heritage sites.

Keywords: grouting technologies, geotechnics, architectural monuments, restoration, cement grouting, Jet Grouting, Bukhara, Egypt, bearing capacity, historical buildings.

Annotatsiya. Maqolada me’moriy yodgorliklarning yuk ko‘taruvchi konstruksiyalarini mustahkamlashda qo‘llaniladigan zamonaviy inyeksion texnologiyalar ko‘rib chiqiladi. Xorijiy tajribani, eng avvalo, Qohiraning tarixiy binolarini (Sorgutamesh masjidi, Abu-Serga cherkovi, Ibn Tulun masjidi) qayta tiklash bo‘yicha Misr amaliyotini tahlil qilish asosida asosiy usullar tizimlashtirildi: sementlash, kimyoviy va epoksid inyeksiyalari, reaktiv sementlash (Jet Grouting). Mustahkamlashdan oldin va keyin poydevorning yuk ko‘tarish qobiliyatini baholashda qo‘llaniladigan geotexnik hisoblash modellari tahlil qilindi. Mahalliy muhandislik-geologik sharoitlar, iqlim xususiyatlari va an'anaviy qurilish materiallarining o'ziga xos xususiyatlarini (paxsa, kuygan g'isht, ganch) hisobga olgan holda Buxoro va O'zbekiston tarixiy qurilish ob'ektlari uchun sanab o'tilgan texnologiyalarni moslashtirish imkoniyati asoslandi. Tadqiqot natijalaridan YUNESKOning Jahon merosi ob'ektlarini tiklash bo'yicha milliy me'yorlarni ishlab chiqishda foydalanish mumkin.

Kalit so‘zlar: inyeksion texnologiyalar, geotexnika, me’moriy yodgorliklar, restavratsiya, sementlash, Jet Grouting, Buxoro, Misr, poydevorning yuk ko‘tarish qobiliyati, tarixiy binolar.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Памятники архитектуры являются бесценным свидетельством материальной культуры человечества. Однако с течением времени под воздействием внешних нагрузок, изменений уровня грунтовых вод, сейсмической активности и биологических факторов несущие конструкции исторических зданий подвергаются деградации. Особую проблему представляют осадка оснований, трещинообразование в кладке и снижение несущей способности грунтовых оснований фундаментов.

В мировой практике для решения этих проблем широко применяются инъекционные (нагнетательные) технологии — метод принудительного заполнения пустот, пор и трещин конструктивных элементов и грунтового основания специальными укрепляющими растворами. Данный метод занимает особое место в реставрационной практике, поскольку при минимальном механическом вмешательстве обеспечивает существенное повышение прочности и стабильности конструкций.

Богатый опыт применения инъекционных технологий накоплен в Египте, где реставрации подвергаются объекты средневековой архитектуры исламского и коптского периодов. Климатические и геотехнические условия Египта — засушливый климат, наличие рыхлых аллювиальных

ISSN 3030-3907

отложений долины Нила, высокий уровень грунтовых вод в исторической части Каира — во многом сопоставимы с условиями Центральной Азии, что делает египетский опыт особенно актуальным для Узбекистана.

Бухара — один из древнейших городов мира, включённый в Список Всемирного наследия ЮНЕСКО. На её территории сосредоточены выдающиеся архитектурные ансамбли IX–XVII веков: мавзолей Саманидов, минарет Калян, ансамбль Пои-Калян, медресе Улугбека и Абдулазизхана, крепость Арк и многочисленные мечети и мавзолеи. Большинство этих объектов выполнены из пахсы и жжёного кирпича на известковом растворе, что предопределяет специфические требования к реставрационным технологиям.

Цель данной статьи — систематизировать существующие инъекционные методы укрепления конструкций, проанализировать египетский опыт их применения и обосновать пути адаптации этих технологий к условиям исторической застройки Бухары и Узбекистана.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНЪЕКЦИОННЫХ МЕТОДОВ УКРЕПЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ.

2.1. Цементационное нагнетание.

Цементационное нагнетание является наиболее распространённым методом укрепления грунтовых оснований и заполнения крупных пустот в кладке. Технология предусматривает инъекцию цементного или цементно-известкового раствора под давлением через заранее пробурённые скважины. Метод эффективен для:

–крупнозернистых и среднезернистых песчаных грунтов;
–оснований с крупными кавернами и пустотами;
–ослабленных оснований исторических фундаментов.

ISSN 3030-3907

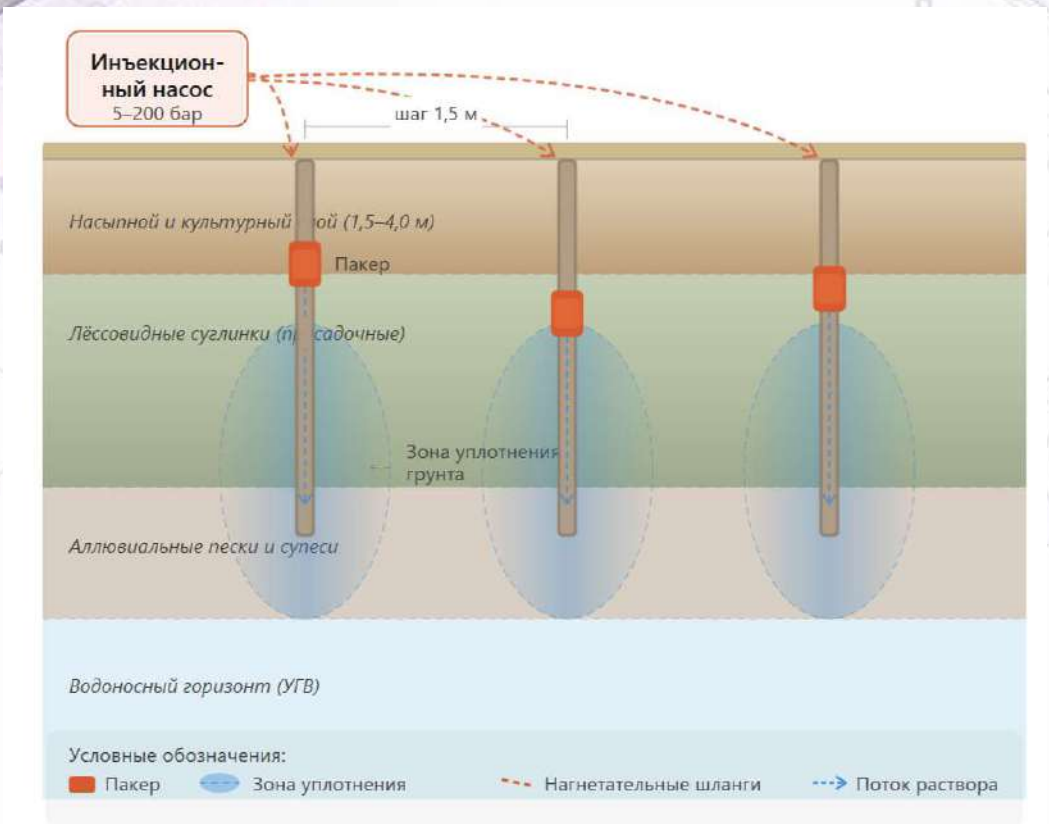


Рис.1. Схема цементационного нагнетания: расположение скважин, пакеров и зон уплотнения грунта (разрез)



Рис.2. План расположения инъекционных скважин относительно фундамента исторического здания (вид сверху)

2.2. Химические инъекции.

ISSN 3030-3907

Химические инъекции применяются при необходимости укрепления мелкозернистых грунтов, водонасыщенных оснований и тонких трещин в исторической кладке. В качестве инъекционных материалов используются силикатные гели, акриловые смолы и полиуретановые составы, обеспечивающие высокую проникающую способность и совместимость с традиционными строительными материалами.

2.3. Эпоксидные инъекции.

Эпоксидные системы применяются для заполнения структурных трещин в бетонных и каменных конструкциях. Метод обеспечивает полное восстановление монолитности элемента с прочностью соединения, превышающей прочность исходного материала. Для исторических объектов важна возможность подбора составов с низкой вязкостью, обеспечивающих проникновение в трещины шириной от 0,1 мм.

2.4. Струйная цементация.

Струйная цементация — высокоэффективный метод создания грунтоцементных колонн путём размыва и одновременного перемешивания грунта с цементным раствором под давлением 300–600 бар. Диаметр формируемых колонн составляет от 0,6 до 1,2 м. Метод обеспечивает значительное повышение несущей способности основания и может применяться при стеснённых условиях строительства, характерных для исторической застройки.

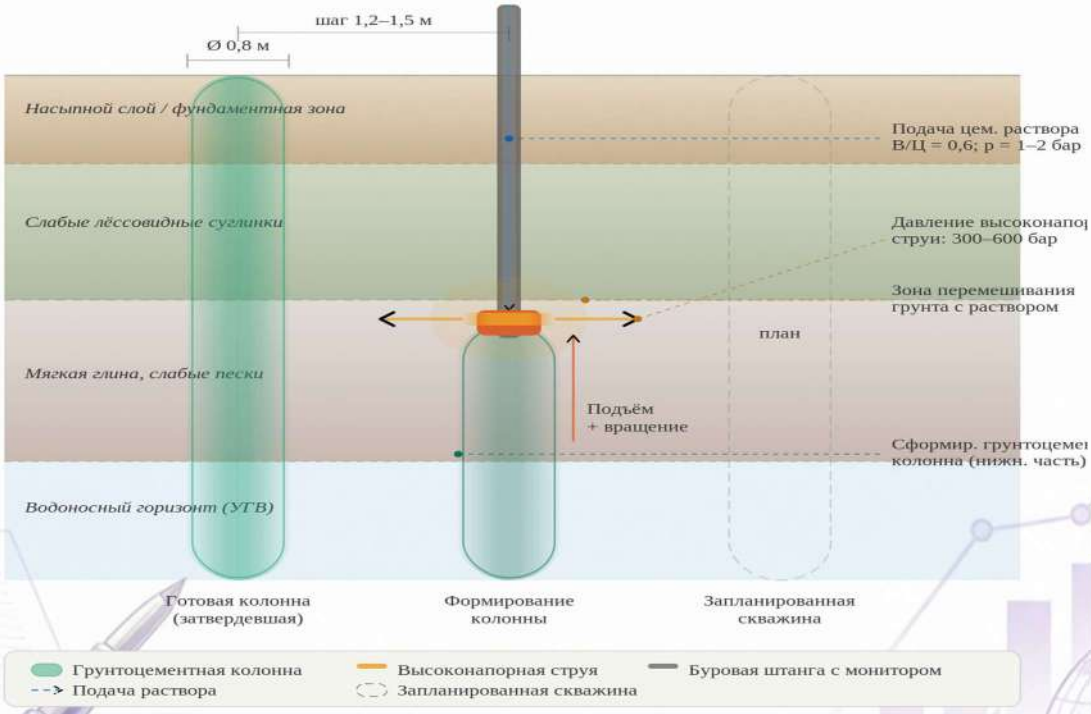


Рис. 3. Схема технологии Jet Grouting: этапы формирования грунтоцементных колонн (разрез)

ISSN 3030-3907

Таблица 1

Сравнительная характеристика инъекционных методов укрепления

Метод	Область применения	Рабочее давление	Эффективность	Совместимость с историч. кладкой
Cement Grouting	Песчаные грунты, крупные пустоты	5–50 бар	Высокая	Средняя
Chemical Grouting	Мелкие трещины, водонасыщ. грунты	2–20 бар	Средняя–высокая	Высокая
Epoxy Injection	Структурные трещины в бетоне и камне	0,5–5 бар	Высокая	Высокая
Jet Grouting	Слабые дисперсные грунты	300–600 бар	Очень высокая	Низкая (только основание)

3. РАСЧЁТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИНЪЕКЦИОННОГО УКРЕПЛЕНИЯ.

Геотехническое проектирование инъекционного усиления основывается на классических уравнениях механики грунтов. Основным критерием является условие несущей способности основания, определяемое по формуле Терцаги (1943):

$$qu = c \cdot Nc + \gamma \cdot Df \cdot Nq + 0{,}5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N\gamma, \quad (1)$$

где c — удельное сцепление грунта (кПа); γ — удельный вес грунта (кН/м³); Df — глубина заложения фундамента (м); B — ширина фундамента (м); Nc, Nq, Nγ — безразмерные коэффициенты несущей способности.

Осадка основания в линейно-деформируемом состоянии определяется по формуле:

$$S = (q \cdot H) / E_s, \quad (2)$$

где q — интенсивность нагрузки (кПа); H — мощность деформируемого слоя (м); E_s — модуль деформации грунта (кПа).

Эффективность инъекционного усиления оценивается коэффициентом улучшения грунта:

ISSN 3030-3907

$$k = E_{s,after} / E_{s,before}, \quad (3)$$

При k > 2,0 укрепление признаётся высокоэффективным; при k < 1,5 эффект усиления считается недостаточным и требует повторного нагнетания или применения альтернативного метода.

Контроль инъекционного процесса осуществляется посредством непрерывного мониторинга давления нагнетания. Предельное давление определяется из условия предотвращения гидравлического разрыва грунта:

$$P_{inj} \leq \sigma_v \cdot K_p + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p}, \quad (4)$$

где σ_v — вертикальное напряжение от собственного веса грунта (кПа); Kp — коэффициент пассивного давления.

4. АНАЛИЗ ЕГИПЕТСКОГО ОПЫТА ИНЪЕКЦИОННОГО УКРЕПЛЕНИЯ ПАМЯТНИКОВ.

4.1. Мечеть Соргутамеш (Каир, XIV в.)

Мечеть Соргутамеш, возведённая в 1356 году, является выдающимся памятником архитектуры мамлюкского периода. В ходе обследования 2000-х годов были выявлены пустоты под полом молельного зала, значительный подъём уровня грунтовых вод вследствие утечек из городских коммуникаций, а также трещины в фундаментной кладке.

Реставрационная программа включала три взаимосвязанных этапа. На первом этапе проведена инструментальная диагностика с применением георадара (GPR — Ground Penetrating Radar), позволившая неразрушающим методом выявить зоны пустот и разуплотнённого грунта. На втором этапе выполнено численное моделирование методом конечных элементов (FEM) с целью прогнозирования поведения основания при нагнетании. На третьем этапе осуществлено цементационное нагнетание по сетке скважин с шагом 1,5 м. Применение данного комплексного подхода позволило снизить пористость грунтового основания и стабилизировать фундаменты без демонтажа исторических полов.

4.2. Церковь Абу-Серга (Старый Каир, V в.)

Церковь Абу-Серга — один из древнейших христианских храмов Египта — возведена на мягких аллювиальных отложениях долины Нила. Обследование выявило неравномерную осадку фундаментов, достигавшую 35 мм, и систему диагональных трещин, характерную для дифференциальных деформаций основания.

Для укрепления основания была применена технология Jet Grouting с формированием грунтоцементных колонн диаметром 0,8 м с шагом 1,2 м. Рабочее давление нагнетания составляло 380–420 бар. В качестве инъекционного материала использовался цементно-известковый раствор водоцементным отношением В/Ц = 0,6–0,8 с добавкой пуццоланового

ISSN 3030-3907

цемента, снижающего тепловыделение при твердении и обеспечивающего долгосрочную химическую совместимость с исторической кладкой.

По результатам геодезического мониторинга, проводившегося в течение двух лет после завершения работ, остаточная осадка не превысила 3 мм, что свидетельствует о высокой эффективности применённого решения.

4.3. Мечеть Ибн Тулуна (Каир, IX в.)

Мечеть Ибн Тулуна (876–879 гг.) — крупнейшая средневековая мечеть Каира. Реставрационная программа 2010-х годов столкнулась с задачей укрепления трещин в кирпичных стенах и сводах при недопустимости применения цементных составов, разрушающих историческую кладку за счёт кристаллизационного давления солей и различия модулей упругости.

В соответствии с принципом минимального вмешательства (minimal intervention), закреплённым в Венецианской хартии 1964 года и рекомендациях ICOMOS, были применены инъекционные растворы на основе гашёной извести с добавками пуццолановых материалов. Состав смесей подбирался с учётом коэффициента термического расширения исторической кладки и паропроницаемости стен. Предварительно выполнено удаление позднейших цементных ремонтных швов, ухудшавших состояние кладки, с заменой их на известковый раствор традиционного состава.

5. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИСТОРИЧЕСКОЙ ЗАСТРОЙКИ БУХАРЫ.

Бухара расположена в пределах Зарафшанской аллювиальной равнины на высоте 225–230 м над уровнем моря. Инженерно-геологический разрез в пределах исторического центра города характеризуется следующим строением:

1) насыпной и культурный слой мощностью 1,5–4,0 м, представленный строительным мусором, золой, органическими включениями;
2) лёссовидные суглинки мощностью 5–12 м, характеризующиеся просадочностью при замачивании (просадочность II типа);
3) аллювиальные пески и супеси на глубине более 10 м;
4) уровень грунтовых вод колеблется в пределах 2,5–6,0 м в зависимости от сезона и состояния ирригационных систем.

Строительные материалы исторических зданий Бухары имеют следующие характеристики: жжёный кирпич средневекового периода обладает прочностью на сжатие 5–15 МПа и высокой открытой пористостью (25–35%); пахсовая кладка характеризуется прочностью 1,5–

ISSN 3030-3907

4,0 МПа и значительной анизотропией свойств; традиционный известковый раствор (ганч) — прочностью 2–6 МПа при повышенной водопоглощаемости.

Основными угрозами для конструкций являются: капиллярное засоление, обусловленное подъёмом минерализованных грунтовых вод; просадка оснований при изменении влажностного режима; сейсмические воздействия (расчётная сейсмичность 7–8 баллов по MSK-64); биологические повреждения (водоросли, лишайники, микроорганизмы).

6. АДАПТАЦИЯ ЕГИПЕТСКОГО ОПЫТА ДЛЯ ПАМЯТНИКОВ БУХАРЫ И УЗБЕКИСТАНА.

6.1. Принципы адаптации.

Адаптация зарубежного опыта инъекционного укрепления к условиям Узбекистана должна осуществляться на основе следующих принципов:

–совместимость инъекционного материала с историческим субстратом по прочности, модулю упругости и паропроницаемости;

–обратимость вмешательства в соответствии с принципами международных реставрационных хартий;

–предварительная неразрушающая диагностика (GPR, ультразвуковое томографирование, термография);

–численное моделирование напряжённо-деформированного состояния системы «конструкция–основание» до начала работ.

6.2. Рекомендуемые технологические решения.

Для укрепления грунтовых оснований фундаментов исторических объектов Бухары, возведённых на просадочных лёссовидных суглинках, оптимальным является применение силикатизации — метода, хорошо зарекомендовавшего себя в Центральной Азии и аналогичного по принципу химическим инъекциям. Нагнетание раствора натриевого жидкого стекла с отвердителем (хлоридом кальция) обеспечивает значительное снижение просадочности грунта и повышение его несущей способности.

Для укрепления трещин в кирпичной кладке и сводчатых конструкциях рекомендуется применение известковых инъекционных смесей типа NHL (Natural Hydraulic Lime) с добавками пуццоланового материала, аналогично решениям, апробированным при реставрации мечети Ибн Тулуна. Указанные составы характеризуются модулем упругости 1,5–3,5 ГПа, близким к показателям исторической кладки Бухары, что исключает концентрацию напряжений на границе «старый материал — инъект».

Для объектов, расположенных в зонах высокого уровня грунтовых вод (крепость Арк, Ляби-Хауз), по аналогии с опытом церкви Абу-Серга

ISSN 3030-3907

может быть применена технология Jet Grouting с формированием грунтоцементных экранов, препятствующих капиллярному подъёму воды к фундаментам.

6.3. Адаптация с учётом сейсмических воздействий.

Существенным отличием условий Узбекистана от египетских является высокая сейсмичность территории. Реставрационные решения должны обеспечивать не только статическую, но и динамическую устойчивость укреплённых конструкций. В этой связи при проектировании инъекционного усиления необходимо выполнять расчёт по несущей способности с учётом сейсмической нагрузки, а параметры инъекционных скважин и схема нагнетания должны обосновываться результатами нелинейного динамического анализа.

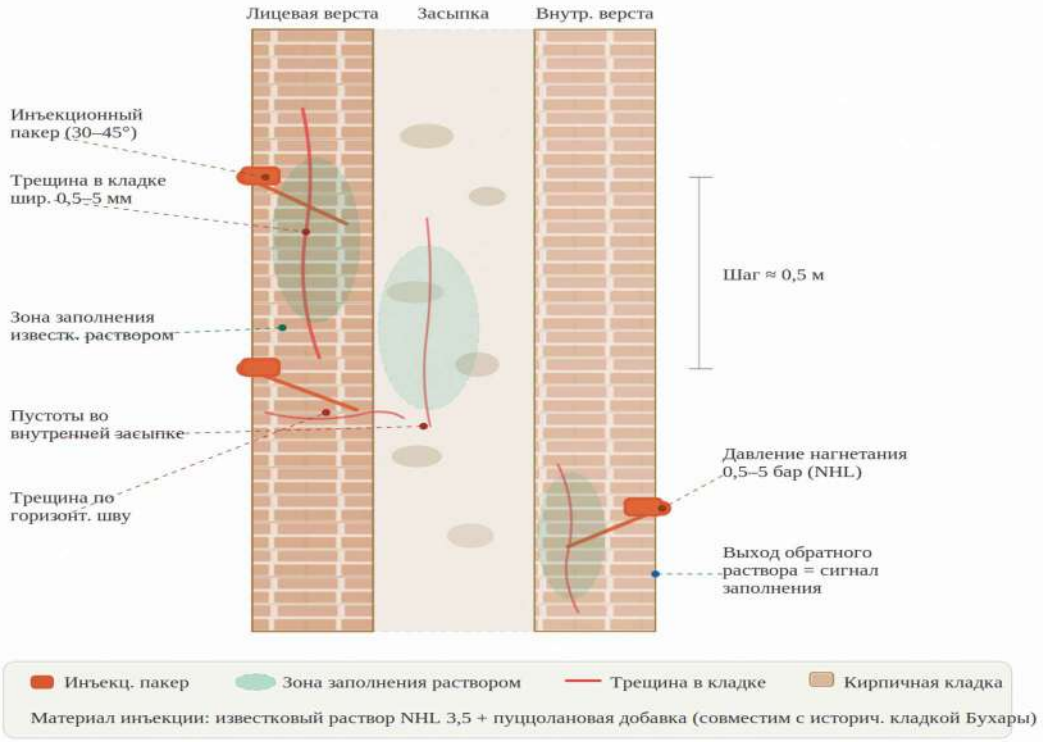


Рис. 4 Инъекционное укрепление кирпичной кладки исторических зданий: разрез трёхслойной стены с пакерами и зонами заполнения.

ISSN 3030-3907

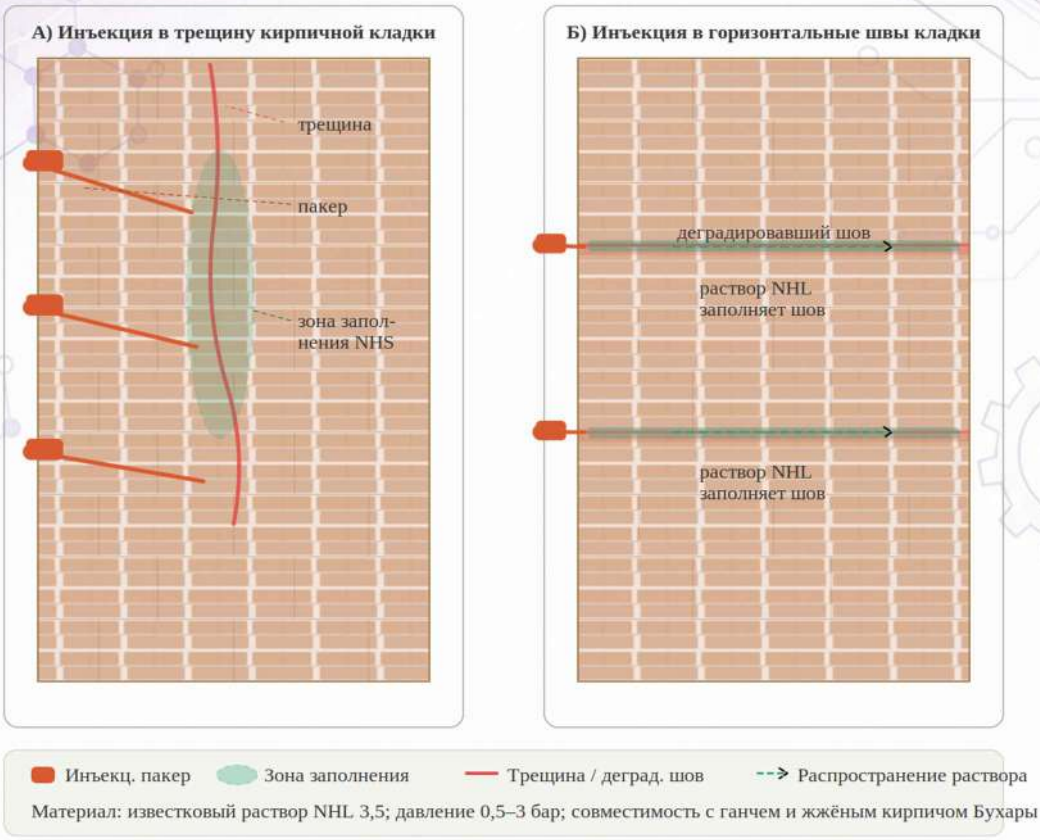


Рис. 5 — Типы инъекционного укрепления кирпичной кладки: А) инъекция в трещину; Б) инъекция в деградировавший горизонтальный шов

Таблица 2

Соответствие египетского опыта объектам исторической застройки Бухары

Египетский объект	Применённый метод	Аналогичный объект в Бухаре	Обоснование аналогии
Мечеть Соргутамеш	GPR-диагностика + Cement Grouting	Мечеть Калян, медресе Мири Араб	Схожие условия: пустоты, подъём грунтовых вод
Церковь Абу-Серга	Jet Grouting	Крепость Арк, ансамбль Ляби-Хауз	Аллювиальные слабые грунты, высокий УГВ
Мечеть Ибн Тулуна	Известковые инъекционные смеси NHL	Мавзолей Саманидов,	Кирпичная кладка на известковом растворе

ISSN 3030-3907

Египетский объект	Применённый метод	Аналогичный объект в Бухаре	Обоснование аналогии
		медресе Улугбека	

7. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ.

Существующая нормативная база Узбекистана в области реставрации памятников архитектуры требует дополнения специальным разделом, регламентирующим применение инъекционных технологий. В качестве основных элементов такого раздела предлагается включить:

1) Классификацию инъекционных методов по областям применения применительно к традиционным строительным материалам Средней Азии (пахса, жжёный кирпич, ганч, известковый раствор).

2) Требования к составу и физико-механическим характеристикам инъекционных смесей с учётом совместимости с историческим субстратом и климата Узбекистана.

3) Порядок проведения предварительной диагностики (неразрушающие методы контроля) и геотехнического обследования оснований.

4) Методику геотехнического расчёта инъекционного усиления с учётом сейсмических воздействий.

5) Требования к послереставрационному мониторингу деформаций оснований и состояния конструкций.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Проведённый анализ показал, что инъекционные технологии представляют собой высокоэффективный и малоинвазивный инструмент укрепления конструкций памятников архитектуры, успешно апробированный в мировой реставрационной практике. Египетский опыт применения данных технологий на объектах средневековой архитектуры Каира имеет непосредственную ценность для Узбекистана вследствие сопоставимости инженерно-геологических условий и конструктивных особенностей исторических зданий.

Для успешной адаптации зарубежного опыта к условиям Бухары и Узбекистана необходимо соблюдение следующих условий: обязательная предварительная диагностика неразрушающими методами; подбор состава инъекционных смесей, совместимых с традиционными строительными материалами региона; учёт сейсмических воздействий в расчётных

ISSN 3030-3907

обоснованиях; разработка специализированного нормативного документа, регламентирующего применение инъекционных технологий на объектах архитектурного наследия Узбекистана.

Реализация предложенных подходов позволит обеспечить долгосрочную сохранность выдающихся памятников Бухары, включённых в Список Всемирного наследия ЮНЕСКО, при соблюдении международных стандартов реставрационной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. — New York: John Wiley & Sons, 1943. — 510 p.
2. Burland J.B., Broms B.B., de Mello V.F.B. Behaviour of foundations and structures: State of the Art Report // Proceedings of the 9th ICSMFE. — Tokyo, 1977. — Vol. 2. — P. 495–546.
3. Atzeni C., Pia G., Sanna U. Mechanical and hydraulic properties of traditional restoration mortars // Restoration of Buildings and Monuments. — 2007. — Vol. 13, No. 4. — P. 251–260.
4. Binda L., Saisi A., Tiraboschi C. Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries // Construction and Building Materials. — 2000. — Vol. 14, No. 4. — P. 199–233.
5. El-Attar M.M., Saleh A.M., Zaher A. Rehabilitation of historic mosques in Cairo // Construction and Building Materials. — 2010. — Vol. 24, No. 5. — P. 672–682.
6. Lombillo I., Thomas C., Villegas L. Non-destructive testing of historic masonry structures: GPR and sonic testing // NDT & E International. — 2013. — Vol. 59. — P. 115–128.
7. Papayianni I., Pachta V., Stefanidou M. Analysis of ancient mortars and design of compatible repair mortars // Construction and Building Materials. — 2013. — Vol. 40. — P. 84–92.
8. Toumbakari E.E. Lime-Pozzolan-Cement Grouts and their Structural Effects on Composite Grouted Masonry: PhD Thesis. — Katholieke Universiteit Leuven, 2002. — 218 p.
9. Van Rickstal F. Grout Injection of Masonry, Scientific Approach and Testing: PhD Thesis. — Katholieke Universiteit Leuven, 2000. — 211 p.
10. Жумаев Б.Б. Конструктивные особенности средневековых зданий Бухары и проблемы их реставрации // Вестник архитектуры и строительства Узбекистана. — 2018. — № 2. — С. 45–53.
11. Хасанов Д.А. Геотехнические аспекты сохранения памятников архитектуры Центральной Азии // Строительство и архитектура. — 2020. — № 3. — С. 78–86.

ISSN 3030-3907

12. Маматов Ф.М. Особенности лёссовых просадочных грунтов Узбекистана и их влияние на состояние фундаментов исторических зданий // Геология и геофизика. — 2019. — Т. 60, № 4. — С. 112–121.
13. ICOMOS. Principles for the Preservation of Historic Timber Structures / adopted by the 12th General Assembly in Mexico. — 1999.
14. Venice Charter. International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites. — ICOMOS, 1964.
15. ШНК 2.01.03-19. Строительство в сейсмических районах. — Ташкент: Госстрой Узбекистана, 2019. — 106 с.

ISSN 3030-3907