

УДК 624.154.1

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-350-367

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ИНЪЕКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

Л. В. Нуждин^{1,2}, А. А. Цуканов¹

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Новосибирск, Россия,

²ООО «Научно-проектное экспертно-консультационное предприятие «ОиФ»,
г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Рассмотрены различные технологии усиления грунтов введением специальных добавок: механического перемешивания и буросмесительной, инъекционной пропитки, высоконапорного инжектирования, струйной цементации. Приведены широко используемые инъекционные материалы: цементные растворы; растворы силиката натрия; карбамидные, фенолформальдегидные и акриловые смолы. Проанализирована возможность применения для усиления грунтов нетрадиционных инъекционных материалов: органосилов; лигносульфонатов; наноматериалов – нанокремнезема, наноглины, нанолистов нитрида бора; биополимеров, биотехнологических материалов – кальцитных преципитаций MICP и EICP. На основании сравнения их ключевых свойств сделаны выводы об основных областях применения нетрадиционных инъекционных материалов, перспективах и направлениях дальнейшего развития методов усиления грунтовых оснований.

Ключевые слова: грунты и грунтовые основания, инъекционные методы усиления, нагнетание растворов, силикаты, смолы, полимеры, наноматериалы, биоцементация

ADVANCED INJECTION MATERIALS FOR GROUND IMPROVEMENT

L. V. Nuzhdin^{1,2}, A. A. Tsukanov¹

¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia,

²LLC «Research and design expert consulting enterprise «O&F», Novosibirsk, Russia

Annotation. The introduction of special materials for ground improvement has been examined through various technologies, including: mechanical mixing and auger mixing, injection grouting, high-pressure injection, and jet grouting. The following are commonly used injection materials: cement grouts; sodium silicate solutions; urea-based; phenol-formaldehyde; and acrylic resins. The feasibility of using unconventional injection materials for soil strengthening has been analyzed: organosilanes; lignosulfonates; nanomaterials – silica nanoparticles, clay nanoparticles, boron nitride nanosheets; biopolymers, biotechnological materials – MICP and EICP calcite precipitations. Based on the comparison of their key properties, conclusions have been drawn regarding the main application areas of unconventional injection materials, the prospects, and the directions for further development of ground improvement methods.

Keywords: soils and ground foundations, injection strengthening methods, in-situ grouting, silicates, synthetic resins, polymers, nanomaterials, biocementations

Эффективными методами усиления грунтов и грунтовых оснований является введение в них различных материалов, которые улучшают строительные свойства, повышают несущую способность и устойчивость, упрочняют и закрепляют грунты [1]. Это может производиться механическим перемешиванием грунта и добавок с поверхности (*Shallow Soil Mixing*) или буромесительными технологиями глубинного смешивания (*Deep Soil Mixing*) на месте их залегания или в специальных бункерах с последующей укладкой в скважины и другие строительные выемки. На практике используются материалы в сухом виде или жидкие растворы реагентов. Другими методами введения добавок являются инъекции растворов через специальные инъекторы. Инъекционные технологии относятся к щадящим, наиболее приемлемым при реконструкции объектов в стесненных городских или промышленных условиях, усилении исторических или аварийных зданий [2]. Они практически не требуют специальных земляных работ и вмешательства в существующие конструкции фундаментов.

В зависимости от рабочих давлении при нагнетании раствора инъекционные технологии подразделяются следующим образом.

- Инъекционная пропитка (*Permeation Grouting*) — цементация, силикатизация и смолизация, при которых инъекционный раствор вводится под низким давлением, заполняя поровое пространство. Закрепление грунта происходит без нарушения его естественной структуры [1].

- Высоконапорное инъецирование (*High-Pressure Injection*) с нагнетанием инъекционных растворов в режиме гидроразрыва под давлением, превышающим структурную прочность грунта, что приводит к нарушению его сплошности в виде щелевых разрывов с последующим их заполнением инъекционной смесью. После твердения смеси в грунте формируются инъекционные тела с относительно высокими физико-механическими свойствами, армирующие грунтовое основание. Для регулирования количества и направленности трещин (инъекционных тел) в грунте используются: инъектора специальной конструкции, способствующей направленному инъецированию (манжетная технология и др.); групповое инъецирование одновременно через несколько инъекторов, расположенных в определенном геометрическом порядке; разнообразные технологические приемы, недопускающие образования случайных трещин [2].

- Струйная цементация (*Jet Grouting*), при которой струей цементного раствора высокого давления грунт разрушается и одновременно перемешивается с цементом. После твердения смеси образуется грунтобетон с прочностными и деформационными характеристиками близкими к бетонам. Выделяют три технологии: однокомпонентную (*Jet 1*) со струей только цементного раствора; двухкомпонентную (*Jet 2*) со струей цементного раствора в потоке сжатого воздуха высокого давления; и трехкомпонентную (*Jet 3*), когда разрушение грунта производится водной струей в потоке сжатого воздуха, а цементный раствор подается отдельной струей [3].

Классификация инъекционных материалов и требования к ним



Для возможности применения и эффективного использования инъекционные материалы должны удовлетворять четырем основным группам требований в зависимости от используемой технологии инъектирования.

Технологические требования:

- Низкая вязкость и высокая проникающая способность. Материал должен проникать в поры и пустоты грунта, обеспечивать разрыв и заполнение образованных в грунтовом массиве трещин. Для водонасыщенных грунтов он не должен легко вымываться и фильтроваться по крупным порам.
- Контролируемое время схватывания или гелеобразования. Оно должно быть достаточно длительным, чтобы заполнить заданный объем грунта, и достаточно коротким, чтобы материал не вымыло грунтовыми водами до того, как он затвердеет. Возможность регулирования временем – ключ к управляемости процесса.
- Технологичность приготовления и применения. Предпочтительны однокомпонентные растворы или смеси с простым смешиванием на месте.
- Сегрегационная устойчивость. Материал не должен расслаиваться при транспортировке и нагнетании.

Эксплуатационные требования (после усиления грунта):

- Прочность и жесткость. Усиленный грунт должен иметь необходимую прочность на сжатие и сдвиг для восприятия эксплуатационных нагрузок.
- Сбалансированная деформативность. Желательно, чтобы усиленный грунтовый массив по деформациям был совместим с окружающим грунтом и конструкцией фундамента, чтобы избежать концентрации напряжений. Жесткие и хрупкие материалы типа обычного цементного камня в этом отношении уступают более эластичным полимерам.
- Долговечность. Способность сохранять свои свойства во времени. Устойчивость к выщелачиванию, агрессивным грунтовыми водами, возможным циклам замораживания-оттаивания (для регионов с холодным климатом – морозостойкость).

Экологические требования:

- Экологическая безопасность. Нетоксичность для людей и природной среды, отсутствие в составе ядовитых и опасных компонентов.

- Устойчивость. Предпочтение материалам из возобновляемого сырья или компонентов с низким содержанием выбросов, негативно воздействующих на окружающую среду углеродных парниковых газов — углекислого газа, метана, закиси азота и т. п. (т. н. «углеродного следа»).

Экономическая целесообразность:

- Конкурентоспособное соотношение цены и качества.
- Доступность для приобретения в необходимых объемах.

Традиционные инъекционные материалы

Наиболее распространенные виды инъекционного закрепления грунтовых оснований производятся по следующим технологиям.

Цементация с помощью цементных растворов (суспензий), которые представляют собой смесь цемента, воды, часто с добавлением песка, иногда небольшого объема глины или других пластификаторов. Усиление грунтов происходит при твердении цементного или цементно-песчаного раствора за счет гидратации. При этом введенный раствор превращается в камень [1].

Достоинствами инъекции цементных растворов являются доступность материалов, их достаточно высокая конечная прочность и низкая стоимость.

Недостатки технологии определяются:

- Ограничением области применения из-за относительно больших размеров в растворах частиц цемента (3...80 мкм) и глинистой добавки, а тем более песчаных частиц. Цементные суспензии могут проникать только в поры и пустоты шириной более 0,2...0,3 мм. Это в основном гравийно-галечниковые и крупнообломочные грунты, отчасти гравелистые и крупные пески. Для инъекции цементных растворов в другие виды грунтов приходится повышать давление нагнетания, что зачастую неизбежно приводит к нарушению сплошности грунта. В этом случае образовавшиеся после отвердения инъекционного раствора в трещинах тела используются как армирование грунтовых оснований [4, 5].

- Наличием седиментации и высокой фильтрации в крупнопористых грунтах. Цементные и песчаные частицы могут неравномерно оседать и отфильтровываться из суспензии грунтом с удалением от инъектора, не доходя до периферии.

- Цементные растворы при твердении обладают свойством усадки.

- Также к недостаткам цементации можно отнести неполное соблюдение экологических требований, т.н. «высокий углеродный след» (при гидратации цемента повышается pH подземных вод, производство портландцемента обеспечивает до 8 % мировых выбросов углекислого газа).

Силикатизация, заключающаяся в ведении в грунт силикатных растворов и их производных, которые при соединении с коагулянтom образуют

гель кремниевой кислоты, цементирующей частицы грунта, главным образом просадочного. Эта технология может применяться в лессовых просадочных грунтах с коэффициентом фильтрации от 0,2 до 20 м/сут и песчаных грунтах с коэффициентом фильтрации от 0,5 до 80 м/сут [1].

На практике применяют: однорастворную силикатизацию на основе силиката натрия; однорастворную силикатизацию на основе силиката натрия и кремнефтористоводородной кислоты; однорастворную силикатизацию на основе силиката натрия и формамида с добавками кремнефтористоводородной кислоты; однорастворную силикатизацию на основе силиката натрия и ортофосфорной кислоты; однорастворную силикатизацию на основе силиката натрия и алюмината натрия; двухрастворную силикатизацию на основе силиката натрия и хлористого кальция; газовую силикатизацию на основе силиката натрия и углекислого газа.

Достоинствами усиления грунтов силикатизацией являются очень низкая вязкость растворов, практически не отличающаяся от воды, и высокая прочность закрепленного грунта.

Недостатки применения силикатизации:

- Высокая токсичность и экологическая опасность отдельных компонентов. Большое содержание углекислого газа в силикатных гелях.
- Возможность синерезиса — самопроизвольного выделения жидкости из геля, сопровождающегося уменьшением его объема, и снижение прочности закрепленного грунта.
- Сложность организации работ при смешивании компонентов, особенно для двухрастворной инъекции.
- Повышенная по сравнению с цементацией стоимость.

Смолизация, основанная на введении в грунт высокомолекулярных органических соединений типа карбамидных, фенолформальдегидных и других синтетических смол в смеси с отвердителями (кислотами, кислыми солями). Закрепление грунта происходит в результате полимеризации смол при их взаимодействии с отвердителем [1].

Наиболее применимыми способами смолизации являются — однорастворная на карбамидных смолах марок М, М-2, М-3, МФ-17 и соляной или щавелевой кислоты.

Достоинствами усиления грунтов смолизацией являются очень низкая вязкость и не высокая адгезия растворов к частицам грунта.

Недостатки применения смолизации:

- Высокая токсичность и экологическая опасность большинства компонентов (в настоящее время применение смолизации жестко ограничено).
- Достаточно строгие требования к условиям производства работ: температуре, рН среды и др., что требует тщательного подбора и контролирования рецептуры состава.
- Высокая стоимость.

В последнее время при поиске перспективных технологий усиления грунтов и обостренной борьбе за экологию [6] сформировалось новое направление — т. н. «зеленые инъекционные технологии» (green grouting) в геотехнике. Их основу составляют применение возобновляемого сырья, отходов сельского хозяйства и промышленности, а также биоминералогические процессы минералообразования [7]. Переход от традиционных материалов к биополимерам, биоминерализации и низкоуглеродным гелям позволяет не только сохранить или повысить механические свойства грунтового основания, но и кардинально сократить эмиссию парниковых газов.

Далее рассмотрены три группы технологий: применение инновационных химических гелей на основе лигнина, органосиланов и геотермального кремнезема, биоминерализации с наномодификаторами, биополимерной стабилизации.

Современные полимерные материалы нового поколения

Органосиланы — это кремнийорганические соединения, в которых атом кремния связан с органическими радикалами. При контакте с водой алкоксигруппы органосилана гидролизуются, образуя силанольные группы, которые в свою очередь образуют водородные связи с гидроксильными группами на поверхности силикатных минералов, представляющих до 90% земной коры и содержащихся в большинстве грунтов. При их высыхании или нагреве происходит конденсация с образованием прочной ковалентной связи между органосиланом и поверхностью минерала. Одновременно молекулы органосилана «сшиваются» друг с другом, формируя наноразмерную пленку (толщиной 4–6 нм). Органический радикал органосилана при этом придает поверхности новые гидрофобные свойства — водоотталкивание [8].

Применение органосиланов в геотехнике — яркий пример перехода от механического заполнения пор при усилении грунтов к химической модификации поверхности его частиц.

В результате введения органосиланов в грунт происходит:

- Увеличение прочности и жесткости грунта. Полимерная пленка упрочняет контакты между частицами грунта. Модуль деформации усиленного грунта после высыхания может возрасти в несколько раз.
- Снижение водопоглощения и водопроницаемости. Усиленный грунт перестает быть капиллярно-активной средой и становится нечувствительным к воде, что гарантирует стабильность его свойств. Это критически важно для предотвращения морозного пучения, разупрочнения при замачивании, суффозии.
- При предварительной обработке укладываемого грунта — улучшение уплотняемости. Гидрофобные частицы лучше скользят друг относительно друга при уплотнении, что позволяет достичь большей плотности при меньших энергозатратах.

Модификация грунта при усилении органосиланами является практически необратимой. Силоксановые связи чрезвычайно прочны и устойчивы к гидролизу, УФ-излучению и перепадам температур.



Рис. 1. Доступность органосиланов и лигносульфонатов

Лигносульфонаты — это водорастворимые полимеры на основе лигнина, образующиеся как побочный продукт при сульфитной варке целлюлозы. В отличие от органосиланов, они действуют не химически, а физико-химически. Полимеры содержат сульфонатные группы, которые способны взаимодействовать с положительно заряженными поверхностями глинистых минералов в грунте за счет ионообмена, снижая их гидрофильность и способность к набуханию. При высыхании волю молекулы лигносульфоната сближаются и образуют прочные полимерные пленки, обволакивающие и связывающие частицы грунта. Пленки имеют аморфную структуру, что придает им эластичность. Лигносульфонаты способствуют «слипанию» мелких частиц в более крупные агрегаты, что улучшает гранулометрический состав грунта и повышает его прочностные свойства [8].

Введение в грунт лигносульфонатов подобно органосиланам приводит к:

- Увеличению прочности на сжатие и сдвиг в 2–3 раза.
- Снижению водопроницаемости и набухания, повышению устойчивости к суффозии.
- С экологической точки зрения материал полностью безопасен для человека и окружающей среды.

Однако, следует отметить, что для образования прочных пленок лигносульфонат должен высохнуть, что в природных условиях может происходить до 20 и более дней. При этом до полного высыхания материал может вымываться грунтовыми водами. Готовый стабилизированный слой, хотя и

обладает повышенной водостойкостью, не является полностью гидрофобным. При длительном контакте с водой возможна его частичная деградация.

Также лигносульфонат чувствителен к дозировке и требуется тщательный подбор его оптимальной влажности. Его переувлажнение при смешивании (как в лаборатории, так и в натуральных условиях) может привести к «переувлажнению» смеси и образованию при быстром высыхании «хрупкой корки» на поверхности, в то время как внутри материал остается слабым.

Основными достоинствами применения лигносульфонатов для укрепления грунтовых оснований дорог, насыпей и дамб являются при достаточно хороших результатах его полная экологическая безопасность и экономичность. Особенно, в регионах с развитой целлюлозно-бумажной промышленностью.

Интересным вариантом усиления грунтов является применение углеродно-нейтрального инъекционного материала – геотермального коллоидного кремнезема, диоксида кремния (CSRGF — colloidal silica recovered from geothermal fluids) [9]. Он является побочным продуктом эксплуатации термальных электростанций, в которых горячая вода, поднимаемая из скважин, содержит его до 30 %. Необходимая тщательная очистка воды приводит к извлечению кремнезема, используемого для получения коллоидного инъекционного раствора. В состав CSRGF входят: водный раствор силиката натрия (жидкого стекла), собственно коллоидный кремнезем и добавки для регулирования pH и кислотного реагента. Механизм гелеобразования основан на реакции дегидратационной конденсации. Время гелеобразования легко регулируется pH от 4–5 минут до 40 минут. Усадка геля отсутствует [10].

Инъектирование CSRGF нашло применение в слабых мелкозернистых песках, где полевые испытания показали увеличение плотности с 1,6 до 2,1 тс/м³ и рост прочности на одноосное сжатие более 2 раз. Увеличение прочности линейно зависит от концентрации кремнезема, ее изменение с 6 % до 10 % дает рост прочности в 2,5 раза.

Особо важным для усиления слабых водонасыщенных песков является сопротивление виброразжижению. Испытания на циклический недренированный сдвиг показали, что усиление CSRGF предотвращает обнуление эффективных напряжений в песке при сейсмических нагрузках. Сопротивление разжижению при применении CSRGF существенно выше, чем у традиционных силикатных гелей. Это означает, что обработанный грунт выдерживает значительно более сильные землетрясения без перехода в текучее состояние. При тестовом землетрясении магнитудой 5,7 в здании станции (в префектуре Фукусима, Япония) фундаменты на усиленном основании не получили осадок, а на необработанном CSRGF участке просели на 120 мм [10].

Нanomатериалы и нанотехнологии

Добавление наночастиц в инъекционные растворы – это не создание отдельного типа материалов, а модификация существующих для придания им принципиально новых свойств.

Они не являются самостоятельными инъекционными растворами, но выступают как мощные модификаторы. Их применение позволяет значительно повысить эффективность традиционных и биологических методов, добиваясь более высоких прочностных показателей при меньшем расходе основных компонентов. Главная проблема на пути широкого внедрения – высокая стоимость и необходимость обеспечения равномерного диспергирования наночастиц в растворе без агломерации.

Нанокремнезем и наноглина. Добавление наночастиц диоксида кремния или слоистых силикатов (бентонита, монтмориллонита) в цементные или полимерные растворы приводит:

- к нуклеации («зародышеобразованию»), при которой наночастицы служат центрами кристаллизации для новообразований (гидратов силикатов кальция в цементе, кристаллов карбонатов кальция в биоцементации). Это ускоряет реакции и делает структуру более мелкозернистой и плотной;
- к уплотнению микроструктуры. Наночастицы заполняют микропоры и микропустоты, которые недоступны для более крупных частиц. Это резко снижает проницаемость и повышает стойкость к агрессивным средам;
- к армированию на микроуровне. Волокнистые или пластинчатые наночастицы (наноглина) могут препятствовать зарождению и распространению микротрещин.

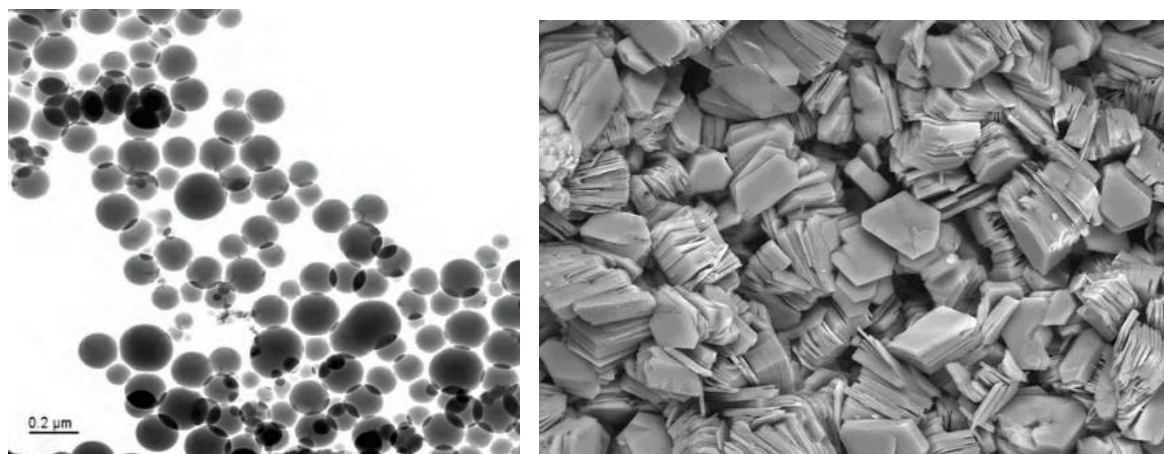


Рис. 2. Нанокремнезем и глинистые наночастицы

Наноленты гексагонального нитрида бора (*h-BN*) относятся к самым перспективным наноматериалам последнего времени. Исследования [11] продемонстрировали его уникальную роль в процессах биоцементации (*MICP* и *EICP*).

НанOLIстам нитрида бора *h-BN* присущи:

- Двумерная слоистая структура, подобная графиту.
- Колоссальная удельная поверхность (более 1400 м²/г).
- Высокая механическая прочность, модуль деформации и модуль Юнга.
- Химическая инертность и наличие функциональных групп на поверхности.

В инъекционных растворах нанOLIсты нитрида бора *h-BN* проявляют следующие свойства:

- Являются центрами нуклеации: Отрицательно заряженная поверхность *h-BN* эффективно притягивает ионы кальция из раствора. Это создает локальные зоны пересыщения, в которых карбонат кальция осаждается гораздо быстрее и эффективнее, чем в общем объеме раствора.
- «Армируют» раствор. НанOLIсты *h-BN*, встроенные в массу новообразованного раствора, работают как арматура на нанOLIуровне, значительно повышая прочность и трещиностойкость «биоцемента».
- Образуют связь с микроструктурной матрицей раствора. Функциональные группы на краях и в дефектах нанOLIстов *h-BN* могут химически связываться с минералами карбонатов кальция, обеспечивая прочное сцепление.

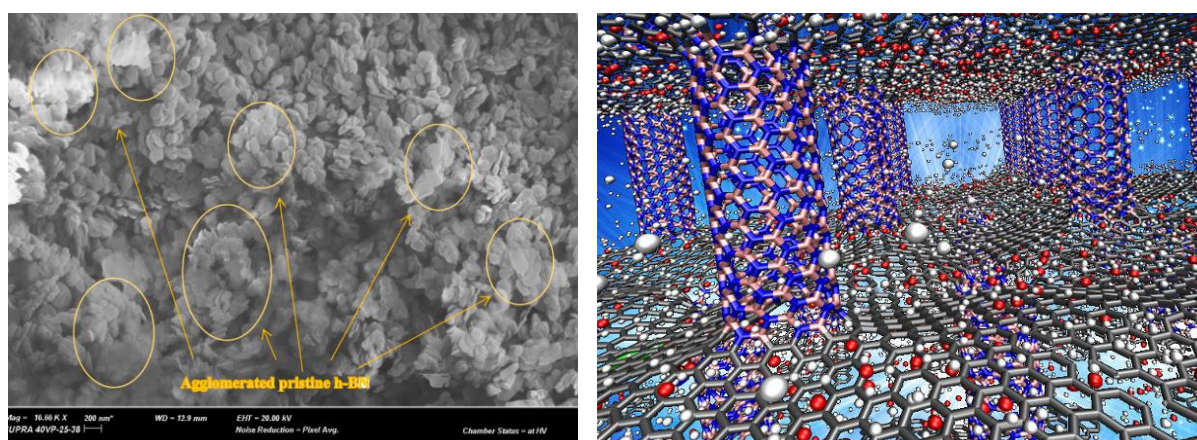


Рис. 3. Образование центров нуклеации – зародышей кристаллов (слева). Структура нанOLIстов нитрида бора *h-BN* (справа)

Экспериментальные исследования показали:

- Оптимальная добавка *h-BN* (20–30 мг/л) увеличивает общее количество осажденного карбоната кальция на 34 % в процессе инъектирования *EICP* и на 28 % для *MICP*.
- Прочность на одноосное сжатие усиленного (стабилизированного) раствором *EICP* песка после 10 циклов обработки возросла на 20 % и на 13 % для *MICP*.
- Избыток нанOLIчастиц (> 100 мг/л) приводил к их агломерации и снижению эффекта, что подчеркивает важность точного дозирования.

Оксид графена (соединение углерода, водорода и кислорода) – также популярная добавка, ускоряющая осаждение ионов кальция, которая может служить основой для роста кристаллов, что улучшает прочностные характеристики материала.

Биотехнологии (микробиологическая цементация)

Применение биотехнологий является самым революционным и экологически чистым подходом к усилению грунтов. Это технология усиления грунта основана на использовании микроорганизмов для осаждения минералов, как правило, карбоната кальция, в порах грунта. При этом не только снижается пористость, но и малорастворимым карбонатом кальция связываются частицы грунта.

Процесс микробиологической цементации (биоцементации) заключается в инъектировании в грунтовый массив раствора, содержащего мочевины (карбамид, диамид угольной кислоты $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$), источник кальция (обычно хлорид кальция CaCl_2) и биологический катализатор — либо живые бактерии (*MICP*), либо фермент уреазы (*EICP*). Биоцементация происходит за счет активности микроорганизмов, которые катализируют химические реакции [11, 12].

Усиление грунта, основанное на биогеохимическом процессе, в ходе которого микроорганизмы стимулируют осаждение карбоната кальция в грунте — (*MICP* — *Microbial-Induced Carbonate Precipitation*).

Для этого в грунт вводят уреазопродуцирующие микроорганизмы, например, бактерии *Sporosarcina pasteurii* и добавляют питательный раствор, состоящий из солей кальция, мочевины и питательных веществ для роста бактерий. Бактерии вырабатывают фермент уреазы, который катализирует реакцию гидролиза мочевины. Ионы карбоната реагируют с ионами кальция, образуя нерастворимый карбонат кальция, который осаждается в виде кристаллов кальцита (реже — арагонита или ватерита), связывая частицы грунта или заполняя пустоты (трещины). Кальцит, арагонит и ватерит — три полиморфных формы карбоната кальция. Основными группами микроорганизмов способными индуцировать осаждение карбонатов являются фотосинтезирующие цианобактерии, микроводоросли; сульфатредуцирующие бактерии; микроорганизмы, участвующие в азотном цикле, в т. ч. уреазопродуцирующие.

Достоинствами *MICP* являются:

- Применимость к разным видам грунтов, включая крупные пески.
- Улучшение строительных свойств: прочности и деформативности грунта. Для песков усиление предотвращает разжижение при землетрясениях. Возможно применение *MICP* для создания биофильтров.
- Улучшение теплопроводности и влагоудерживающей способности.
- Высокая долговечность усиления.

- Существенно меньшие энергозатраты по сравнению с другими методами.
- Низкий уровень загрязнения и экологичность, т. к. используются естественные процессы. Помимо этого, возможно применение *MICP* для очистки загрязненных территорий и иммобилизации тяжелых металлов и радионуклеидов за счет захвата в кристаллическую решетку карбоната кальция. В качестве источников кальция или питательных веществ возможно использование промышленных отходов.



Рис. 4. Усиление грунтового основания микробиологической цементацией

Ограничением к применению *MICP* служат:

- Высокая стоимость начальных затрат на реагенты и микроорганизмы, хотя в долгосрочном плане расходы снижаются.
- Чувствительность технологии к условиям среды. Эффективность применения зависит от температуры, влажности, pH, осмотического давления, наличия подходящих питательных веществ.
- Скорость протекания процесса усиления после инъецирования *MICP* может быть ниже, чем у традиционных технологий.
- Зависимость технологии от выживаемости микроорганизмов и необходимость поддержания жизнеспособности бактерий в полевых условиях.

а. Усиление грунта, основанное на химической реакции с участием фермента уреазы — ферментативно-индуцированное осаждение карбоната кальция (*EICP* — Enzyme-Induced Carbonate Precipitation). Как и при *MICP* в результате каталитического гидролиза мочевины происходит осаждение карбоната кальция, который связывает частицы грунта. Увеличивается его прочность, жесткость, устойчивость к эрозии, снижается деформа-

тивность. На прочность усиленного грунта влияет не только количество осаждения карбоната, но и способ подготовки раствора. Для повышения эффективности усиления можно использовать модификации раствора, например, добавки специальных веществ, способствующих удержанию воды, применять более экологичные источники мочевины, в качестве источника обезжиренного сухого молока использовать отходы молока, добавлять в грунт наполнители типа измельченной макулатуры. Экологические показатели технологии определяются такими компонентами как мочевина, кальций, фермент уреазы и обезжиренное сухое молоко.

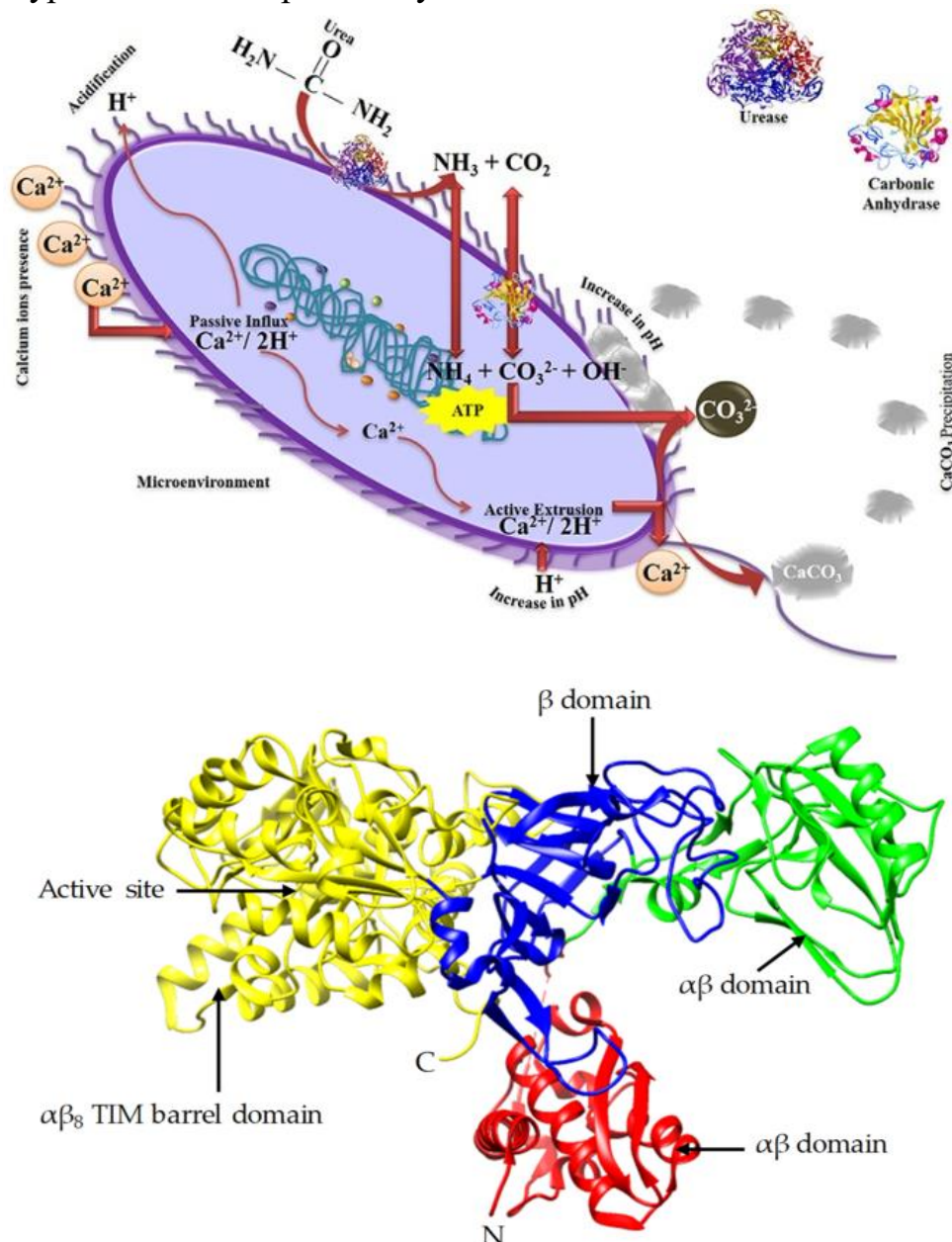


Рис. 5. Схематичное изображение процесса микробиологически индуцированного (MICP) и ферментативно-индуцированного (EICP) осаждения карбоната кальция

Преимуществами применения *EICP* служат:

- Небольшой размер кристаллов уреаза (порядка 12 нм), что позволяет эффективно усиливать широкий диапазон грунтов даже с малыми размерами частиц, имеющих поры небольших размеров.
- Технология не требует культивирования бактерий, что делает её проще и экологически чище по сравнению с *MICP*.

Недостатками, препятствующим применению *EICP* являются:

- Для эффективности этой технологии усиления грунта необходима оптимизация состава химических инградиентов и времени выдержки – реакции осаждения. Эффективность *EICP* зависит от концентрации и активности фермента, pH и температуры среды, типа грунта и количества циклов обработки.
- Отсутствие центров зародышеобразования (недостаточная нуклеация) в усиливаемом грунте может приводить к осаждению карбоната кальция в порах и его неэффективность для связывания частиц грунта.
- В отличие от *MICP* наличие конкурентных ингибиторов, например, ионов тяжелых металлов, может влиять на эффективность осаждения карбоната кальция.
- Очень высокая стоимость чистой уреазы.

Биотехнологии (биополимерные гели)

Известный интерес представляет усиление грунтов инъекцией гелеобразующих биополимеров. Биополимеры – это класс полимеров, встречающихся в природе в естественном виде. Наиболее эффективны для усиления грунтов полисахариды: ксантановая камедь, карбоксиметилцеллюлоза, а также гуаровая камедь, геллановая камедь, камедь рожкового дерева и другие [13]. Поскольку взаимодействие биополимеров с грунтом происходит на поверхности частиц, большое значение имеет площадь преобладающего размера частиц [12, 14]. Помимо инъектирования биополимеры могут вводиться в грунт смешиванием, распылением и тампонированием.

Наиболее эффективно усиление глинистых грунтов, когда полимеры напрямую связываются с наиболее мелкими глинистыми частицами [15]. Они слабее взаимодействуют с крупными песчаными частицами и в меньшей степени влияют на свойства песчаных грунтов. Механизм усиления грунта включает три компонента: образование водородных связей между гидроксильными группами биополимера и поверхностью глинистых минералов; электростатические взаимодействия между отрицательно заряженными карбоксильными группами и катионами на поверхности частиц, а также физическое заполнение пор гелем. [7, 16].

В песчаных грунтах, где частицы кварца электрически нейтральны, биополимеры действуют иначе: они не вступают в химическую адсорбцию, а работают как физические мостики, обволакивая песчаные частицы и связывая их в единую структуру. Нужно отметить, что образование полимерно-

глинистых матриц при взаимодействии биополимеров с глинистыми минералами в свою очередь способствует агрегации и более крупных песчаных частиц друг с другом [11].

Усиление биополимерами приводит к увеличению прочности грунтов на сжатие и на сдвиг, снижению деформативности и водопроницаемости, объемной стабильности и гидравлической устойчивости. При контакте с водой биополимеры могут образовывать гидрогели, что будет снижать эффективность усиления грунта.

Основные достоинства биологических полимеров: дешевизна и экологичность. Поскольку биополимеры являются органическими и разлагаемыми, их долгосрочная стойкость изучена не полностью.

Биополимеры можно вводить в грунт вместе с синтетическими полимерами, чтобы одновременно использовать свойства обоих видов полимеров. При этом следует учитывать сопротивляемость синтетических полимеров не только физическим и химическим воздействиям, но и биологическому разрушению.

Ксантановая камедь (ксантан, xanthan gum) — это полимер-структурообразователь, получаемый путем ферментации углеводов с использованием бактерий. Используется во многих сферах в качестве загустителя и стабилизатора растворов. Её введение улучшает свойства грунтов за счет двух механизмов: связывания и адгезии частиц (образования электростатических и водородных связей с глинистыми минералами, агрегации частиц, создания пространственных сетчатых структур); заполнения пор и пленкообразования (инкапсулирования частиц грунта, уменьшения толщины гидратной мембраны глинистых минералов, формирования полимерной пленки на поверхности частиц, снижения миграции воды, образования вязкого коллоидного геля) [7, 16]. Применение ксантановой камеди не зависит от pH среды (в диапазоне от 2 до 12) и температуры (от $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$). Раствор устойчив к кислотам и щелочам, ферментам и поверхностно активным веществам (ПАВ). Благодаря этим свойствам ксантановая камедь формирует устойчивую структуру усиленного грунта [13].

Недостатком ксантановой камеди является недостаточная долговечность. В зависимости от условий возможно её достаточно быстрое разложение микроорганизмами от недели до полугода.

Известны исследования и применение на практике ксантановой камеди в комбинации с бентонитом, гуматами, казеином, цементом [18, 19], поливинилацетатными [18] и полипропиленовыми волокнами [7, 19].

Ксантановую камедь в качестве инъекционного связующего исследовали для усиления песчаных и глинистых грунтов в комбинации с дискретными короткими полипропиленовыми волокнами, вместе с цементным раствором и без него.

Оптимальная концентрация ксантановой камеди составляет 0,25 %, при этом достигается максимальное повышение прочности грунта. Дальнейшее увеличение концентрации может приводить к избыточному содержанию геля и образованию слабых зон. В отличие от усиления только ксантановой камедью введение полипропиленовых волокон приводит к повышению пластичности и вместо хрупкого разрушения возможны деформации до 15 %. Короткие полипропиленовые волокна (6 мм, концентрацией 0,8 %) создают более равномерную пространственную сетку и эффективнее сопротивляются сдвигу. [7].

Гуаровая камедь (*guar gum*) — полимерное соединение полисахарида из плодов бобового растения гуара [13, 16]. Вещество обладает достаточной жесткостью и повышенной эластичностью, растворимо в холодной воде. Имеет хорошую устойчивость к циклам замораживания-оттаивания, замедляет возникновение кристаллов льда, образуя структурированный гель. В сравнении с ксантановой камедью менее термостабильна. Используется при высоконапорной инъекции в нефтяной промышленности для разрыва пласта.

Подобная гуаровой камеди по химическому составу, может использоваться камедь рожкового дерева (*carob gum*), но она растворяется только в горячей воде.

Карбоксиметилцеллюлоза (или целлюлозная камедь, *СМС*) хорошо растворима в воде и не реагирует на органические растворители. Применяется в качестве модификатора вязкости (загустителя) зависящего от температуры, что удобно в некоторых случаях. Применяется в нефтяной промышленности для разрыва пласта.

Существует нерастворимый в воде вид карбоксиметилцеллюлозы, который имеет меньшее значение *DS* (количество карбометильных групп в целлюлозной цепи). Преимущественно он используется для химического «склеивания» частиц грунта, повышения сцепления, предотвращения эрозии, укрепления склонов, в качестве модификатора вязкости и для повышения долговечности усиленного массива.

Инъекции карбоксиметилцеллюлозы способствуют уплотнению грунта, улучшают его прочностные и деформационные характеристики. Увеличивают плотность, влагостойкость и морозостойкость, снижают пучинистость грунта [13, 14].

Карбоксиметилцеллюлоза натрия (натриевая соль целлюлозогликолевой кислоты или NaСМС) рассматривалась для применения в качестве армирующего материала для улучшения механических свойств лёссовых грунтов Китая. Полученные положительные результаты по повышению плотности сухого грунта, модуля деформации, прочности на сжатие и сдвиг позволили сделать выводы о перспективности материала для устойчивого

укрепления лёссовых грунтов. Отмечено, что из трех исследованных различных концентраций NaСМС (0,5 %, 1,0 %, 1,5 %) для строительства малоэтажных зданий достаточно улучшение прочностных и деформационных характеристик грунтов при использовании концентрации 1,0 % [14].

Для усиления глин низкой прочности в Нигерии изучалась возможность применения в качестве добавок биополимеров из порошка рисовой шелухи (RHP) и порошка кожуры кассавы (или маниока, *СРР*), которые сравнивались карбоксиметилцеллюлозой (*СМС*). Испытания на опытном участке показали не только возможность применения *СРР*, но и его эффективность по сравнению с широко применяемой *СМС*. **Микроструктурный анализ** показал, что в обоих случаях на частицах глины образовывалась полимерная пленка, которая прочно связывала агрегаты. При использовании *СРР* также формировался кальцит, который дополнительно укреплял частицы [6].

Заключение

Из анализа приведенных выше данных следует вывод, что определить технологию усиления грунтов можно при изучении инженерно-геологических условий площадки и конкретной строительной ситуации, а также производственных возможностей и экономических параметров выполнения работ.

Для крупных инфраструктурных объектов с большими объемами насыпи из крупнообломочных и песчаных грунтов рационально применение органосилов и лигносульфонатов. Хорошим вариантом усиления оснований ответственных сооружений с высокими требованиями к надежности и долговременной стабильности, в т. ч. в сейсмоопасных районах, является использование геотермального коллоидного диоксида кремния (*CSRGF*) при его доступности. Наиболее перспективными для усиления слабых грунтовых оснований служат технологии микробиологической цементации (*MICP* и *EICP*), особенно в сочетании с добавлением наночастиц нитрида бора *h-BN*. Представляется эффективным разработка гибридных технологий, включая использование традиционных способов усиления грунтов.

Список источников

1. Крутов, В. И. Проектирование и устройство оснований и фундаментов на просадочных грунтах / В. И. Крутов, А. С. Ковалев, В. А. Ковалев. – М.: Изд-во АСВ, 2013. – 544 с.
2. Nuzhdin, M.L., Nuzhdin, L.V. Strengthening of supporting ground of a damaged building by high-pressure injection of a moving cement-sand mixture // Proceedings of the 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Cape Town, 7-9 October 2019). – Pretoria: University of Pretoria, 2019. – P. 785–788.
3. Малинин, А. Г. Струйная цементация грунтов / А. Г. Малинин. – М. Изд-во «Стройиздат», 2009. – 195 с.
4. Нуждин, М. Л. Расчетное обоснование эффективных схем усиления фундаментов мелкого заложения контурным армированием жесткими армозементами /

М. Л. Нуждин, А. Б. Пономарев // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, № 4. – С. 5-6. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.01.

5. Нуждин, М. Л. Экспериментальные исследования усиления грунтового основания свайных фундаментов армированием жесткими включениями / М. Л. Нуждин // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 5-15. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.01.

6. Ojuri O.O., Ramdas V., Aderibigbe E.A., Williams C.G., Ramchuran S., Al-Nageim H Improving strength and hydraulic characteristics of regional clayey soils using biopolymers // *Case Studies in Construction Materials*. – 2022. – No. 17. – 11 p. – <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01319>.

7. Abbasi F., Choobbasi A.J., Roushan K. Enhancing strength and ductility of xanthan gum-stabilized clayey sand: Impact of polypropylene fiber content and length // *Case Studies in Construction Materials*. – 2025. – No. 23. – 24 p. – <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05667>.

8. Barbieri D.M., Hoff I., Mork M.B.E. Organosilane and lignosulfonate as innovative stabilization techniques for crushed rocks used in road unbound layers // *Transportation Geotechnics* – 2019. – No. 22. – 14 p. – <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100308>.

9. Persoff P., Apps J., Moridis G., Whang J.M. Effect of dilution and contaminants on sand grouted with colloidal silica // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 1999. – No. 125(6). – 461 p.

10. Terui T., Motohashi T., Sasahara S., Inazumi S. Development and application of geothermally derived silica grout for carbon-neutral soil stabilization // *Case Studies in Construction Materials*. – 2025. – No. 22. – 22 p. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04297>.

11. Fouladi A.S., Arulrajah A., Chu J., Horpibulsuk S. Effects of hexagonal boron nitride nanosheets on the biostabilization of recycled sands for geotechnical fill applications // *Transportation Geotechnics*. – 2023. – No. 49. – 14 p. – <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101420>.

12. Khatami H.R., O’Kelly B.C. Improving mechanical properties of sand using biopolymers // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2013. – No. 139(8). – P. 1402-1406.

13. Armistead S.J., Rawlings A.E., Smith C.C., Staniland S.S. Biopolymer stabilization/solidification of soils: a rapid, micro-macro, cross-disciplinary approach // *Environmental Science & Technology*. – 2020. – No. 54(21). – P. 13963-13972.

14. Ma H., Ma Q. Experimental studies on the mechanical properties of loess stabilized with sodium carboxymethyl cellulose // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2019. – No. 2 – 1-8 p.

15. Cabalar A.F., Awraheem M.H., Khalaf M.M. Geotechnical properties of a low-plasticity clay with biopolymer // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2018. – No. 30(8). – 10 p.

16. Bozyigit I., Javad A., Altun S. Strength properties of xanthan gum and guar gum treated kaolin at different water contents // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2021. – No. 13(5). – P. 1160–1172.

17. Chang I., Im J., Prasidhi A.K., Cho G.C. Effects of xanthan gum biopolymer on soil strengthening // *Construction and Building Materials*. – 2015. – No. 74. – P. 65-72.

18. Park S.S. Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand // *Construction and Building Materials*. – 2011. – No. 25(2). – P. 1134-1138.

19. Tang C., Shi B., Gao W., Chen F., Cai Y. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber-reinforced and cement-stabilized clayey soil // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2007. – No. 25(3). – 194 p.

© Нуждин Л.В., Цуканов А.А., 2026