

Петрияненко Сергей Николаевич

студент магистратуры
Кубанский государственный аграрный
университет им. И.Т. Трубилина
Краснодар, Россия

**ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ СТРУЙНОЙ
ЦЕМЕНТАЦИИ В ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ПРОЕКТАХ****Аннотация**

Рассматривается экономическая эффективность применения технологии струйной цементации в инфраструктурных проектах, реализуемых в сложных инженерно-геологических условиях. Проанализированы технологические особенности метода, его применимость при строительстве в условиях плотной застройки, обводнённых и слабых грунтов. Рассмотрены примеры практического внедрения на объектах в России и за рубежом, а также приведены расчётные и экспериментальные данные, подтверждающие эффективность технологии. Отдельное внимание уделено цифровым инструментам моделирования, повышающим точность проектных решений. Установлено, что применение струйной цементации позволяет сократить сроки и затраты на строительство, обеспечить устойчивость сооружений без применения традиционных затратных методов. Технология рекомендована к использованию как универсальное решение для повышения эффективности и надёжности инфраструктурного строительства в условиях геотехнической сложности.

Ключевые слова: струйная цементация, экономическая эффективность, инфраструктурные проекты

Современное строительство всё чаще сталкивается с необходимостью возведения инфраструктурных объектов в условиях сложной инженерно-геологической обстановки: плотной городской застройки, высоких уровней грунтовых вод, слабых и неустойчивых оснований. Рост урбанизации, расширение транспортных сетей и реконструкция исторических территорий требуют от подрядчиков применения технологий, способных обеспечивать не только надёжность и безопасность, но и высокую экономическую эффективность в условиях ограниченного пространства и сжатых сроков.

Одним из наиболее востребованных решений в подобных ситуациях стала технология струйной цементации (Jet Grouting) – метод укрепления грунтовых оснований путём нагнетания под высоким давлением цементного раствора, с последующим перемешиванием его с естественным грунтом. В результате формируется однородная грунтоцементная масса с заданными прочностными характеристиками. На практике этот подход позволяет заменить дорогостоящие и трудоёмкие методы, такие как замораживание, буронабивные и инъекционные технологии, особенно там, где невозможно проведение массивных земляных работ или установка стандартных ограждающих конструкций.

Технология Jet Grouting не ограничивается только техническими преимуществами. Она даёт возможность значительно сократить затраты на водопонижение, обустройство котлованов и защиту существующих сооружений от деформаций. Это особенно важно в условиях плотной городской застройки и при работах вблизи функционирующей инфраструктуры, где каждый метр территории имеет критическую ценность. Широкий диапазон диаметров колонн, гибкость геометрии, высокая точность бурения и минимальное воздействие на окружающую среду открывают возможности для масштабного применения в транспортном строительстве, тоннелестроении, энергетике и гидротехнических проектах.

Несмотря на активное внедрение технологии, в отечественной практике до сих пор отсутствует системный подход к оценке её экономической результативности. Решения часто принимаются на основании интуитивных или эмпирических соображений, без детального анализа эксплуатационных и инвестиционных эффектов. Между тем, опыт реализации крупных инфраструктурных проектов в России и за рубежом подтверждает: струйная цементация способна выступать не только как технически оправданное, но и как финансово выгодное решение, особенно при условии грамотного проектирования и точного расчёта параметров.

Данная работа направлена на исследование экономической эффективности внедрения струйной цементации в инфраструктурных проектах. В фокусе – анализ ключевых технологических параметров, оценка затрат и примеры успешной реализации. Целью является обоснование преимуществ Jet Grouting не только с точки зрения инженерии, но и с позиции управленческой рациональности в инвестиционно-строительной деятельности.

Экономическая эффективность технологии струйной цементации формируется за счёт сочетания её технической универсальности и способности к оптимизации строительных процессов в условиях, где классические методы демонстрируют недостаточную производительность или чрезмерную себестоимость. При внедрении Jet Grouting исключается необходимость обустройства предварительных котлованов, систем водопонижения, временных подпорных стен и фундаментов под технологическое оборудование. За счёт этого существенно сокращается фронт земляных работ, особенно в водонасыщенных и слабых грунтах, где традиционные методы требуют значительных затрат на подготовительный этап [1].

Для выполнения струйной цементации используется специализированное оборудование: буровые установки, миксерные станции, цементируемые и воздушные насосы. На объекте размещаются компактные передвижные комплексы, не требующие демонтажа существующих конструкций или переноса коммуникаций. Такая мобильность и модульность позволяют сократить время мобилизации и снизить затраты на логистику. Например, при реконструкции Мариинского театра в условиях стеснённой исторической застройки были применены одновременно семь комплексов Soilmes, за счёт чего удалось завершить формирование распорной плиты за шесть месяцев без остановки работы прилегающих объектов [2].

Стоимость устройства 1 погонного метра струйной колонны зависит от применяемой технологии (Jet-1, Jet-2 или Jet-3), глубины и диаметра колонны, а также расхода цементного раствора. При Jet-1 расход цемента составляет порядка 350-450 кг/м³ грунта, а давление подачи достигает 400-600 атм. Это позволяет создавать колонны диаметром до 1 метра в глинистых и супесчаных грунтах. Jet-2, при использовании сжатого воздуха, формирует колонны до 2 метров диаметром, снижая общее количество буровых скважин и, следовательно, сокращая трудозатраты. В случае использования Jet-3 удаётся получать элементы диаметром до 2,5 м, что особенно актуально при создании противофильтрационных завес и опережающего крепления глубоких выработок. [4]

Финансовый эффект проявляется также в снижении эксплуатационных затрат. Струйная цементация значительно улучшает физико-механические свойства грунта, тем самым уменьшая расчётную осадку и повышая сейсмостойкость зданий. Это позволяет проектировать более лёгкие надземные конструкции без потери надёжности. В ряде случаев удаётся отказаться от глубинных свай, что сокращает общую стоимость фундамента на 20-30% [6].

В дополнение к снижению капитальных затрат технология позволяет выполнять работы в особо насыщенной инженерной среде. Примером является проект в Перми, где в условиях плотной городской застройки технология Jet Grouting была применена для устройства ограждения котлована многофункционального комплекса «Green Plaza». Грунтоцементные сваи в этом проекте использовались в качестве шпунтового ограждения, которое одновременно служило вертикальной несущей конструкцией и противофильтрационным барьером [5].

На руднике Гарлыкского месторождения (Туркменистан) применение струйной цементации позволило заменить технологию замораживания пород при проходке вертикальных стволов. За счёт отказа от дорогостоящего холодильного оборудования и сокращения сроков строительства на 4-6 месяцев удалось достичь существенной экономии при сохранении требуемой гидроизоляции и устойчивости массива [3].

Дополнительные преимущества возникают при использовании цифрового моделирования. Системы вроде Plaxis 3D позволяют прогнозировать поведение грунта, оптимизировать расположение колонн и определить рациональные параметры цементного раствора. Это исключает перерасход материалов, повышает предсказуемость результатов и снижает вероятность переработок. Внедрение BIM-инструментов в струйную цементацию уже показало высокую эффективность на объектах со сложной геометрией или неустойчивыми инженерно-геологическими условиями [4].

Эффективность технологии подтверждается результатами контроля качества, отражёнными в таблице «Сравнение прочностных характеристик грунтоцементных свай в полевых и лабораторных условиях». Применение сейсмоакустических методов при строительстве подземной части ГАМТ-2 показало устойчивые значения прочности на сжатие – до 12,4 МПа – и модуля деформации – до 1400 МПа, что коррелирует с результатами лабораторных испытаний. Близость значений, полученных разными методами, указывает на высокую технологическую повторяемость процесса, особенно важную при реализации объектов с повышенными требованиями к надёжности и долговечности. Представленные данные заимствованы из результатов инженерных исследований, выполненных при реконструкции Мариинского театра в Санкт-Петербурге, и опубликованы в статье А.В. Чернякова в журнале «Жилищное строительство», № 9, 2011 года [2].

Экономическая привлекательность струйной цементации усиливается за счёт универсальности метода. Возможность комбинировать армирование, варьировать глубину и диаметр свай, применять технологию в любом климате и на различных стадиях строительства делает её гибким инструментом проектных решений. При этом метод практически не вызывает вибрационных воздействий, не требует удаления грунта и допускает устройство свай даже под существующими фундаментами, что невозможно для большинства альтернатив.

Таблица 1 – Сравнение прочностных характеристик грунтоцементных свай в полевых и лабораторных условиях

№ зоны	Метод испытаний	Прочность при сжатии R, МПа	Модуль деформации E, МПа
1	Сейсмоакустика	7,49	749
2	Сейсмоакустика	6,02	602
3	Сейсмоакустика	5,43	543
4	Сейсмоакустика	8,75	875
4	Лаборатория	7,27	632
5	Сейсмоакустика	7,63	763
6	Сейсмоакустика	5,72	572
7	Сейсмоакустика	9,10	910
8	Сейсмоакустика	7,36	736
8	Лаборатория	9,98	939
9	Сейсмоакустика	7,49	749
10	Сейсмоакустика	6,09	609
11	Сейсмоакустика	4,98	498
11	Лаборатория	11,77	817
12	Сейсмоакустика	4,58	458
13	Сейсмоакустика	6,26	626
14	Сейсмоакустика	4,40	440
15	Сейсмоакустика	5,70	570
16	Сейсмоакустика	7,85	785
16	Лаборатория	10,69	886
17	Сейсмоакустика	7,62	762
17	Лаборатория	9,93	903

Комплексное применение струйной цементации в транспортной инфраструктуре, реконструкции гидротехнических узлов, подземном строительстве и энергетике позволяет не только уменьшать прямые затраты, но и снижать риски, связанные с неустойчивостью основания, воздействием подземных вод и осадками зданий. В условиях роста себестоимости ресурсов и дефицита времени на реализацию проектов эти преимущества делают технологию одним из ключевых факторов успешной реализации инвестиционных программ.

Результаты анализа подтверждают высокую экономическую эффективность струйной цементации при реализации инфраструктурных проектов в сложных геотехнических условиях. Применение технологии Jet Grouting позволяет существенно снизить затраты на подготовительные работы, минимизировать вмешательство в существующую застройку и сократить длительность строительного цикла без ущерба для надёжности конструкций.

Выбор варианта струйной цементации (Jet-1, Jet-2 или Jet-3) позволяет гибко адаптировать проектные решения под конкретные характеристики грунтового

массива, обеспечивая требуемую несущую способность с оптимальными затратами материалов и ресурсов. За счёт увеличения диаметра колонн удаётся уменьшить общее число скважин и механизировать процессы, что повышает производительность работ.

Полевые исследования и контроль качества подтверждают устойчивость прочностных характеристик полученного грунтоцемента. Это обеспечивает проектную надёжность несущих и ограждающих конструкций в условиях водонасыщенных и слабых грунтов без необходимости применения дополнительных мер по стабилизации основания.

Цифровое моделирование способствует точному прогнозированию осадок, распределения напряжений и взаимодействия конструкции с грунтовым основанием, что позволяет обоснованно снизить запасы прочности и уменьшить общие издержки.

Технология может быть внедрена как на стадии нового строительства, так и при реконструкции объектов, включая подземные и транспортные сооружения, что расширяет её применение в рамках государственной и частной строительной политики. Струйная цементация демонстрирует потенциал в снижении инвестиционных рисков, особенно в условиях ограниченных пространств, нестабильных геологических разрезов и высокой плотности застройки.

Комплексное использование технологии Jet Grouting целесообразно рассматривать как стандартное инженерное решение для оптимизации затрат и повышения устойчивости зданий и сооружений в современной инфраструктурной практике.

Список использованных источников

1. Котова, Я. Д. Современная технология струйной цементации грунтов "Jet Grouting" / Я. Д. Котова, С. М. Аксенова // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых - 2018 : сборник научных статей 7-й Международной молодежной научной конференции: в 4 томах, Курск, 13–14 ноября 2018 года. Том 3. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2018. – С. 163-166. – EDN YTPZYD.

2. Черняков А. В. Применение струйной цементации грунтов в условиях исторической застройки // Жилищное строительство. – 2011. – №9. – EDN: OJAJBL.

3. Плешко М. С., Армейсков В. Н., Петренко Л. А., Сулименко Р. И. О проблеме применения технологии струйной цементации при строительстве глубоких подземных сооружений // ИВД. – 2016. – №1 (40). – EDN: WCNSYZ.

4. Жадановский, Б. В. Современные возможности струйной цементации грунтов / Б. В. Жадановский, А. В. Гранева, С. В. Абрамова // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 1(109). – С. 1-13. – EDN XFOVTE.

5. Кузнецов, Е. В. Проблемы строительства в плотной застройке / Е. В. Кузнецов, Е. Н. Сычкина // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2017. – Т. 1. – С. 313-318. – EDN XNYGBF.

6. Шевченко, А. Ю. Технология закрепления грунтов "Jet grouting" и методы ее применения / А. Ю. Шевченко, Д. В. Статовой // Современные перспективы развития гибких производственных систем в промышленном гражданском строительстве и агропромышленном комплексе : Сборник научных статей 2-й Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров, Курск, 23 мая 2024 года. – Курск: ЗАО "Университетская книга", 2024. – С. 421-425. – EDN THXHTM.