

Научная статья  
УДК 624

**Е.А. Хамзина**

**E.A. Khamzina**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Российская Федерация

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СТРУЙНОЙ  
ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТОВ В КАЧЕСТВЕ  
ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ЗАВЕСЫ**

**AN OVERVIEW OF THE APPLICATION OF THE TECHNOLOGY  
OF JET CEMENTATION OF SOILS AS  
AN ANTI-FILTRATION CURTAIN**

Проанализирована история развития технологии создания грунтоцемента, приведена классификация грунтоцемента по виду технологии, а также по функциональному назначению. Рассмотрен опыт практического применения струйной цементации грунтов в качестве противофильтрационной завесы. Проанализирована отечественная нормативно-техническая база на проектировании грунтоцементных противофильтрационных завес. Рассмотрен вопрос добавок в состав водцементного раствора для струйной цементации при выполнении противофильтрационных завес.

**Ключевые слова:** грунтоцемент, противофильтрационная завеса, струйная цементация.

The history of the development of technology for the creation of ground cement is analyzed, the classification of ground cement by type of technology, as well as functional purpose is given. The experience of practical application of jet cementation of soils as an anti-filtration curtain is considered. The domestic regulatory and technical base for the design of soil-cement antifiltration curtains is analyzed. The issue of additives to the composition of water-cement mortar for jet cementation when performing anti-filtration curtains is considered.

**Keywords:** ground cement, anti-filtration curtain, jet cementation.

**Введение**

В сложных грунтовых условиях при наличии высокого уровня грунтовых вод или же в задачах создания непроницаемых оболочек успешно применяются технологии создания грунтоцементного массива. В настоящее время широкое распространение получили методы струйной цементации грунтов, такие как Jet 1, Jet 2, Jet 3.

Исходя из обозначенной актуальности, целью данной работы являлся обзор применения технологии струйной цементации в качестве противодиффузионной завесы. Для достижения поставленной цели в ходе работы были решены следующие задачи:

1. Рассмотреть историю развития струйной цементации.
2. Привести классификацию видов струйной цементации.
3. Проанализировать возможность применения технологии струйной цементации в качестве противодиффузионной завесы.
4. Провести обзор нормативных документов в области устройства грунтоцементных противодиффузионных завес.
5. Рассмотреть вопрос применения добавок в состав водоцементного раствора для струйной цементации при выполнении противодиффузионных завес.

### **История развития грунтоцементной технологии**

Среди всех методов улучшения грунта струйная цементация, безусловно, заняла особое место. В настоящее время всем известно, что струйная цементация может обеспечить решение широкого спектра геотехнических задач, например, таких как укрепление слабого основания, усиление существующих фундаментов, создание крепления стен котлована. Однако эта довольно распространенная и весьма универсальная технология является результатом длительной последовательности технических разработок, которые продолжаются до сих пор.

В середине 1950-х гг. компания Intrusion Prepackt из Кливленда, штат Огайо, впервые запатентовала метод смешивания грунта с цементом, также известный как «смешанная свая на месте» [1]. Основой для развития послужили методы разрушения материалов и горных пород, базирующиеся на использовании тонких струй воды высокого давления, которые были известны в гидромеханизации еще с 30-х гг. XX в. [2]. Опыт такой обработки горных пород вдохновил японских инженеров использовать его в качестве инструмента для улучшения структуры грунта с использованием энергии высоконапорной струи. Так, переняв опыт инженеров из США и опыт в гидромеханизации, запатентовали технологию струйной цементации грунтов в Японии в 1971 г. [3]. Исследования, использующие принципы разрушения грунта высокими давлениями не только для разрезания горных пород, но и для перемешивания грунтов с цементом, были проведены примерно в 1965 г. братьями Ямакадо [4].

Первым вариантом технологии струйной цементации было СССР – Chemical Churning Pile (химически перемешанная свая), автором технологии был Наканиши, распространили технологию компания Konoike Construction, а научному миру ее представил профессор Мики из Токийского университета [5]. Изначально использовались химические вяжущие. Они выбрасывались через сопла диаметром от 1,2 до 2,0 мм, расположенные в нижней части простой буровой штанги, которая вращалась во время инъекции. Но вскоре из-за ряда

проблем, связанных с окружающей средой, они были заменены водоцементными растворами [6]. В 1973 г. итальянский подрядчик СССР *cantieri* стал первым, кто сформировал колонны ССР, используя сверхвысокое давление (35 МПа) и высокие скорости потока (от 100 до 250 л в минуту) через два небольших сопла (диаметром до 2,4 мм), диаметр грунтоцемента соответствовал 30–60 см. Спустя несколько лет той же группой ученых была разработана эволюция технологии, известная как *Jumbo Special Pile (JSP)* – особенно большая свая. Технология была направлена на увеличение размеров элементов, выполняемых струей цементного раствора за счет снабжения водоцементного потока оболочкой из сжатого воздуха, с целью уменьшения потери энергии в струе и сохранения ее перемешивающей способности на большем расстоянии – аналог современной технологии *Jet 2* [4]. С помощью такой технологии получался диаметр колонны от 80 до 200 см.

Основная конкурирующая группа «Кадзима» [4], возглавляемая Яхиро (*Yahiro and Yoshida*) также разработала в 1970 г. метод *Jet Grout (JG)*, при этом методе производилось одновременное бурение скважины и ее цементация, однако к 1975 г. они переняли идею вращения стержней и добавили к ней высоконапорную струю воды, породив *Column Jet Grout (CJG)* – этот метод состоял из одновременного подъема и вращения стержня, в нижней части которого располагалось два сопла: верхнее сопло, из которого подавались вода и сжатый воздух, и нижнее сопло, которое выбрасывало цементный раствор, получая диаметр 150–300 см [7], – технология стала прототипом современной *Jet 3*.

Изначально струйная цементация грунтов рассматривалась лишь как метод для улучшения свойств грунтов основания. Однако в 1980-х гг. в Европе – Германии, Италии и Великобритании, технология зарекомендовала себя как надежный геотехнический инструмент и использовалась в качестве фундаментов, при прокладке тоннелей, гидротехническом строительстве.

На рынке США струйная цементация появилась в 1979 г., однако должного развития не получила из-за неизведанности технологии и предполагаемых юридических рисков, к 1984 г. было завершено лишь несколько проектов с применением однокомпонентных и трехкомпонентных систем [7]. Однако через некоторое время эта технология завоевала популярность в Соединенных Штатах, а затем и в Канаде, поскольку она обеспечивала практичные и экономически-эффективные решения сложных геотехнических вопросов. В дальнейшем технология стала популярной в большинстве стран Южной Америки, особенно в Бразилии [5].

Развитие струйной цементации в Китае началось в конце 1970-х гг. и впервые было использовано при строительстве ограждающей конструкции котлована на заводе *Baoshan Steel Inc.*, Шанхай. С развитием городского строительства, начиная с 1990-х гг., струйная цементация получила большое распространение в подземном строительстве в мегаполисах, таких как Шанхай, Пекин и Гуанчжоу. Также применялась в крупномасштабных гидротехнических проектах, таких как как проект дамбы на реке Янцзы и Проект «Сяоланди» на Желтой реке. С 1990 г.

Китай стал страной-лидером с наибольшим объемом струйной цементации в мировой строительной отрасли.

В нашей стране первый проект струйной цементации был разработан организацией «Гидроспецпроект» и осуществлен ВО «Гидроспецстрой» Минэнерго СССР во второй половине XX в. в 1970-х гг. при выполнении при устройстве вертикальных противофильтрационных завес вокруг некоторых гидротехнических сооружений, например, таких как Загорская ГЭС при устройстве временной ПФЗ в котловане [2]. Данная технология начала интересовать исследователей в нашей стране приблизительно в 80-х гг. прошлого века в лаборатории закрепления грунтов НИИОСП имени Н.М. Герсеванова. Широкое применение струйной цементации в СССР началось в середине 1990-х гг. Технологию начали применять такие компании, как «Гидроспецпроект», «НИИОСП», «Ингеоком», «Инженерное бюро Юркевича», «НИИпромстрой», «ВНИИГиМ», «Геосистема», «Интермелиорация», «Геореконструкция», «Космос» и другие [8].

В наши дни технология стремительно развивается. Относительная экономическая стабильность, поддержка строительной отрасли со стороны государства, установившиеся связи между Российскими строительными компаниями и зарубежными поставщиками материалов и оборудования – все это сегодня помогает современным строительным технологиям развиваться, в том числе и технологии струйной цементации грунтов. Отечественные компании, ориентирующиеся на современный уровень строительного производства, начали применять технологию на различных строительных объектах.

### **Классификация грунтоцементных элементов**

Согласно СП 291.1325800, по способу устройства грунтоцементные элементы можно разделить на две подгруппы:

- 1) изготавливаемые способом струйной цементации грунтов;
- 2) изготавливаемые методом глубинного перемешивания.

Глубинное перемешивание – технология, позволяющая создавать грунтоцементные конструкции путем механического перемешивания грунтов в естественном залегании с твердеющим материалом без специального извлечения грунта на поверхность с помощью специального бурового устройства в процессе его погружения или извлечения с вращением.

Более подробно рассмотрим технологию струйной цементации грунтов.

Струйная цементация – закрепление грунта технологиями, позволяющими разрушать грунт струей цементного раствора с добавлением воздушной или водной струи, в зависимости от технологии:

– однокомпонентная технология (Jet 1) – перемешивание грунта с цементом производится струей цементного (цементно-бентонитового или цементно-глинистого) раствора;

– двухкомпонентная технология (Jet 2) – для увеличения объема закрепляемого грунта применяется струя из сжатого воздуха, образующего воздушную оболочку вокруг струи цементного раствора;

– трехкомпонентная технология (Jet 3) – разрушение грунта производится струей воды, окутанной оболочкой из сжатого воздуха, а цементный раствор подается в виде отдельной струи;

– усовершенствованные технологии.

Подробная классификация технологий струйной цементации приведена в таблице.

Классификация технологий струйной цементации

Технология	Jet 1	Jet 2	Jet 3
Параметр сравнения			
Состав струи	Цементный раствор	Цементный раствор + воздух	Цементный раствор + воздух + вода
Физический смысл	Разрушение грунта струей цементного раствора с одновременным перемешиванием	Разрушающая грунт струя цементного раствора окутана в воздушную оболочку, тем самым снижается сопротивление трения по боковой поверхности струи	Струя воздуха + вода, используется для разрушения грунта и создания в нем полостей, в дальнейшем заполняемых цементным раствором
Достоинства	+ Простота и технологичность исполнения оборудования; + повышенные прочностные и деформационные характеристики	+ Большой диаметр, в сравнении с Jet 1	+ Колонна, состоящая из чистого цементного раствора; + повышенные прочностные и деформационные характеристики, в сравнении с однокомпонентной и двухкомпонентной технологиями
Недостатки	– Сравнительно небольшой диаметр	– Более сложное технологическое оборудование; – меньшая прочность, в сравнении с Jet 1 (так как встречаются пустоты от пузырьков воздуха)	– Сложность технологической схемы
Диаметр, м: – пески – супеси, суглинки – глины	1,0 0,7–0,8 0,6	2,0 1,5 1,2	2,5 1,5–2,0 1,0

В общем случае на параметры грунтоцементного элемента, такие как прочность и диаметр, влияют следующие технологические параметры:

- давление нагнетания – определяет энергию струи и, как следствие, радиус ее действия. Однако эта зависимость не линейна. При достижении определенного давления (порядка 400–450 атм) дальнейшее его увеличение повышает диаметр грунтоцементных колонн незначительно [9];

- водоцементное отношение – подбирается в зависимости от поставленной задачи. Для более прочных конструкций применяют пониженное водоцементное отношение (меньше стандартного  $WC = 1,0$ ), однако густые цементные растворы приводят к более быстрому изнашиванию технологического оборудования;

- расход цемента – находится в диапазоне от 350 до 700 кг/м<sup>3</sup>. От этого параметра зависят прочность, деформативность, водонепроницаемость грунтоцемента.

По функциональному назначению различают следующие виды ГЦЭ:

- отдельные элементы, используемые для закрепления грунта и увеличения значений их физико-механических характеристик;

- временные несущие и ограждающие элементы в конструкции котлована;

- грунтовые анкеры, удерживающие ограждения котлованов, подпорные стены и т.д.;

- вертикальные и горизонтальные элементы противofильтрационного экрана;

- вертикальные и горизонтальные геотехнические экраны;

- конструкции усиления существующих фундаментов и несущие конструкции новых фундаментов.

### **Применение грунтоцемента в качестве противofильтрационной завесы**

Вопрос отвода воды из котлована решается разными методами, однако в некоторых случаях применение методов водопонижения может привести к дополнительным осадкам окружающей застройки, которые могут превышать предельно допустимые [10], или же объем откачанной воды будет настолько велик, что утилизировать ее будет весьма затруднительно. В таких случаях грунтоцементные конструкции могут выступать как горизонтальные, так и вертикальные противofильтрационные завесы.

Вертикальная противofильтрационная завеса выполняет свою функцию за счет заглубления на 1,5–2 м в водоупорный слой грунта, за счет чего пресекается поступление воды в котлован.

Горизонтальная противofильтрационная завеса применяется в том случае, если водоупорный слой слишком глубоко или отсутствует вовсе. Горизонтальная конструкция получается значительно дороже вертикальной, поэтому при ее устройстве требуется экономическое обоснование. Также достоинством горизонтальной конструкции является возможность использования ее в качестве горизонтального диска жесткости в сложных геологических условиях [9].

Грунтоцементные противofильтрационные завесы позволяют защищаться не только от грунтовых вод, но и от воздействия на почвы агрессивных составляющих продуктов захоронения различных отходов.

Но несмотря на множество преимуществ технологии, существует ряд недостатков:

- высокая стоимость технологии;
- отсутствие гарантии проектных геометрических и прочностных параметров;
- сложное техническое оборудование для производства работ.

Теоретическим и практическим исследованиям задач использования грунтоцемента в качестве противofильтрационных завес посвящены работы А.Г. Малинина, О.А. Маковецкого, С.С. Зуева, З.Г. Тер-Мартirosяна, П.В. Струнина, И.Я. Харченко и др.

### **Анализ нормативно-технической базы на проектирование грунтоцементных противofильтрационных завес**

Основные требования к проектированию, реализации и контролю грунтоцементных противofильтрационных завес отражены в нормативных документах СП 22.13330, СП 291.1325800, СП 45.13330, СП 103.13330.

Анализ отечественной нормативно-технической документации позволяет сделать вывод, что основными критериями, предъявляемыми к грунтоцементному массиву, выступающему в роли противofильтрационной завесы, являются:

- прочность грунтоцемента;
- фильтрационные характеристики;
- допустимый градиент напора;
- устойчивость от всплытия;
- сплошность по фронту и глубине;

Геометрические параметры.

Прочность грунтоцемента – количественный показатель прочности на одноосное сжатие закрепленного грунта, воспринимающего осевую статическую нагрузку до состояния разрушения (п. 3.9 291.1325800). Согласно п. 7.2.9 СП 291.1325800.2017, прочность грунтоцемента для обеспечения

устойчивости против размыва и суффозии должна приниматься проектом не менее 0,5 МПа. Большая прочность закладывается на основании табл. 5.1 СП 291.1325800.2017, в зависимости от типа грунта.

К фильтрационным характеристикам грунтоцемента можно отнести коэффициент фильтрации и параметр перетока (отношения коэффициента фильтрации грунтоцементного материала к толщине ограждения). Согласно п. 6.16 СП 103.13330.2012, коэффициент фильтрации грунтоцементной противофильтрационной завесы не должен превышать 0,005 м/сут. Параметр перетока нормируется в п. 6.4.6 СП 291.1325800 – 0,05 сут<sup>-1</sup> (для 2-рядного ограждения) и 0,01 сут<sup>-1</sup> (для 3-рядного ограждения); при расчетах строительного водопонижения и постоянных дренажей; первых 10–6 сут<sup>-1</sup> – при расчетах барражного эффекта.

Градиент напора – отношение разности гидростатических напоров воды (потери напора) к длине пути фильтрации, согласно ГОСТ 30416-96. На основании табл. 14.8 СП 45.13330 допустимый градиент напора в зависимости от того, временная конструкция или постоянная, принимается равным 150–200. В табл. 2 СП 103.13330 приведено значение допускаемого градиента напора – 105.

Оценивается устойчивость против всплытия противофильтрационных завес, так как этот конструктивный элемент размещается ниже уровня подземных вод. Методика расчета приведена в п.9.31 СП 22.13330.2016

Так как противофильтрационная завеса подразумевает под собой условно водонепроницаемую конструкцию, к ней предъявляются требования сплошности по фронту и глубине, которые обеспечивают правильно подобранные геометрические параметры. Для снижения рисков образования отверстий к противофильтрационным завесам предъявляются требования по допустимым отклонениям при проведении работ. Согласно табл. 14.4 СП 45.13330, допустимо смещение осей в плане ± 5 см, отклонение по вертикали 0,5 %, толщина + 20 см, глубина + 20 см.

Геометрические параметры, такие как шаг и толщина, назначаются исходя из условия сплошности конструкции. Для расчета шага грунтоцементных элементов приведена методика в п. 7.2.4 СП 291.1325800. Толщина же определяется расчетом на всплытие и фильтрационную прочность, однако регламентируется минимальная толщина – 1,5 м.

### **Применение добавок в состав водоцементного раствора для струйной цементации при выполнении противофильтрационных завес**

Строительные свойства грунтоцемента можно улучшить путем введения в водоцементный раствор различных добавок.



Согласно СП 291.1325800.2017, при устройстве грунтоцементных конструкций для противофильтрационных завес и экранов допускается применять цементно-бentonитовые или цементно-глинистые растворы. Присутствие бентонита повышает седиментационную устойчивость и реологические свойства, снижает водоотделение и улучшает противофильтрационные свойства грунтоцементного массива, однако бентонит снижает прочностные характеристики и значительно увеличивает время схватывания смеси [11]. Количество бентонитовой добавки от массы цемента, согласно разным источникам [11, 12], составляет 1–10 %.

При наличии фильтрационных течений, которые могли бы размывать новообразованный грунтоцементный элемент, необходимо применять добавки, ускоряющие схватывание раствора (например, жидкое стекло или хлорид кальция). Рекомендуемый объем добавок составляет 1–2 % от массы цемента и уточняется на этапе опытных работ [СП 291.1325800.2017].

### Заключение

Технологии создания грунтоцементных элементов берут свое начало еще в середине XX в. и в данный момент имеют широкое распространение в подземном строительстве. За время своего развития технология претерпела множество новшеств и инноваций, благодаря чему сейчас существуют различные варианты создания грунтоцемента: глубинное перемешивание и струйная цементация. Струйная цементация, в свою очередь, подразделяется на однокомпонентную, двухкомпонентную и трехкомпонентную технологии. Она широко используется, в том числе и для создания вертикальных и горизонтальных противофильтрационных завес. Современная нормативно-техническая база регламентирует различные параметры для проектирования и реализации подобных конструкций, а также позволяет вводить в состав добавки для улучшения различных технических характеристик.

Однако проблема подбора состава и создания грунтоцемента с улучшенными характеристиками не изучена должным образом. В литературе встречаются разнящиеся рекомендации касаясь ввода добавок и получаемых физических и прочностных характеристик. Научный интерес вызывают также вопросы оценки фильтрационной способности грунтоцементных элементов, в частности, определения коэффициента фильтрации, ведь в современной практике все чаще встречаются фильтрационные задачи.

### Список литературы

1. Kenneth B., Andromalos P.E., Eric W., Bahner P.E. Recent soil mixing application in the transportation industry [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.geo-solutions.com/> (дата обращения: 07.11.2023).

2. Мангушев Р.А., Усманов Р.А., Ланько С.В., Конюшков В.В. Методы подготовки и устройства искусственных оснований: учебное пособие. – М., СПб.: Изд-во АСВ, 2012. – 266 с.
3. Головин К.А., Лежебоков А.В., Назаров А.П. Исследование технологии гидроструйной цементации двухкомпонентными водоцементными струями // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. – № 12-2. – С. 349–353.
4. Croce P., Flora A., Modoni G. Jet Grouting Technology, Design and Control. – Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2014. – 302 p.
5. Xanthakos P.P., Abramson L.W., Bruce D.A. Ground control and improvement. – John Wiley & Sons, 1994. – 15 p.
6. Сайт компании «Chemicalgrouting» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.chemicalgrout.co.jp/en/about/message.html> (дата обращения: 07.11.2023).
7. Wang Z.F., Shen S.L., Ho C.E., Kim Y.H. Jet Grouting Practice: an Overview // Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. – 2013. – Vol. 44, no.4. – P. 88–96.
8. Черняков А.В. Совершенствование теоретических основ и практических методов применения струйной цементации грунтов в конструктивных решениях транспортных сооружений: автореферат. – 2011. – 70 с.
9. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. – М.: Изд-во «Стройиздат», 2010. – 226 с.
10. Харченко И.Я., Богомолова О.В. Строительно-технологические особенности применения струйной цементации грунтов при устройстве противодиффузионных завес // Жилищное строительство. – 2014. – № 3.
11. Гладков И.Л., Жемчугов А.А., Малинин Д.А. Технология струйной цементации грунтов в условиях плотной городской застройки // Жилищное строительство. – 2013. – № 9.
12. Зоценко Н.Л., Тимофеева Е.А. Шламовый амбар для отходов нефтегазовых скважин с грунтоцементным противодиффузионным экраном [Электронный ресурс] // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2015. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/shlamovyy-ambar-dlya-otходov-neftegazovyh-skvazhin-s-gruntotsementnym-protivodifфузионnym-ekranom> (дата обращения: 19.11.2023).
13. Сайт компании ЗГАЭС [Электронный ресурс]. – URL: <https://zagaes.rushydro.ru> – история строительства (дата обращения: 07.11.2023).

### Сведения об авторах

Научный руководитель – **Татьянников Даниил Андреевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: tatiannikovda.spg@yandex.ru

**Хамзина Екатерина Андреевна** – магистрант группы ПГС1-23-1м строительного факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: katya2409yakovleva@gmail.com

**Финансирование:** исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов:** автор и научный руководитель заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад автора:** 100 %.

**Получена:** 15.01.2024

**Одобрена:** 15.01.2024

**Принята к публикации:** 15.01.2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Хамзина, Е.А. Обзор применения технологии струйной цементации грунтов в качестве противofiltrационной завесы / Е. А. Хамзина // *Master's Journal*. – 2024. – № 1. – Art. № 04.

Please cite this article in English as: Khamzina E.A. Review of the application of the technology of jet cementation of soils as an anti-filtration curtain. *Master's Journal*, 2024, no. 1, art. no. 04.