

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2025, Том 17, № 1 / 2025, Vol. 17, Iss. 1 <https://esj.today/issue-1-2025.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/50SAVN125.pdf>

2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Марков, И. В. Особенности применения ограждающих конструкций котлованов в условиях сложившейся городской застройки / И. В. Марков, Е. М. Пугач // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 1. —

URL: <https://esj.today/PDF/50SAVN125.pdf>

**For citation:**

Markov I.V., Pugach E.M. Engineering aspects of retaining structures for deep excavations in dense urban environment. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(1): 50SAVN125. Available at: <https://esj.today/PDF/50SAVN125.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 624.137.4; 624.137.7; 624.138.232.1; 624.138.24

**Марков Иван Владимирович**

АО «Мосинжпроект», Москва, Россия

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
Москва, Россия

E-mail: [Markov\\_iv@bk.ru](mailto:Markov_iv@bk.ru)

**Пугач Евгений Михайлович**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
Москва, Россия

Доцент кафедры «Технологий и организации строительного производства»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: [tsp-tvz@mail.ru](mailto:tsp-tvz@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2832-1941>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=416367](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=416367)

## Особенности применения ограждающих конструкций котлованов в условиях сложившейся городской застройки

**Аннотация.** В статье рассмотрены технологии устройства и особенности возведения ограждающих конструкций котлованов без разработки грунта (шпунт, сваи, погружаемые ударным способом, вибропогружением и статическим вдавливанием), с разработкой грунта под сооружение конструкции (стена в грунте) и путем искусственного улучшения свойств грунтового массива (струйная цементация), возможность применения ограждений в различных гидрогеологических условиях. Руководствуясь наличием ограничений технологий устройства ограждающих конструкций котлованов, был произведен сравнительный анализ эффективности использования существующих решений в различных инженерно-геологических и организационно-технологических условиях строительства. Все рассмотренные типы конструкций и технологии устройства хорошо применимы в дисперсных грунтах, при этом для статического вдавливания характерна меньшая производительность, вариантов метода «стена в грунте» — увеличение времени цикла по причине необходимости обслуживания рабочего органа землеройной машины. Использование струйной цементации ограничено наличием дисперсных несвязных грунтов. Для качественной оценки организационно-технологических характеристик устройства ограждений котлованов проведено сравнение скорости производства работ, мобильности машин и оборудования, распространенности (доступности) оборудования, потребности в площадях для размещения оборудования, материалоемкости, режима (регулярности) поставки материалов и конструкций, возможности использования технологии в условиях плотной городской застройки. Скорость производства работ способами забивки и

вибропогружения высокая, статическое вдавливание значительно уступает, из-за большого количества подготовительных и производственных процессов устройство стены в грунте и элементов, полученных по технологии струйной цементации, более продолжительно. Наибольшая мобильность характерна для машин, задействованных на процессах вибропогружения. Забивка, вибропогружение и буровые сваи, минимально зависящие от периферийного технологического оборудования и имеющие возможность изготовления и укрупнения элементов ограждения вне строительной площадки наиболее предпочтительны в условиях плотной городской застройки.

**Ключевые слова:** ограждающие конструкции котлованов в условиях плотной городской застройки; шпунтовые ограждения; забивка свай; вибропогружение шпунта; вдавливание свай; стена в грунте; струйная цементация грунтов

## Введение

Дефицит свободного пространства в центре крупных городов приводит к увеличению объемов подземного строительства [1; 2]. При устройстве котлованов в стесненных городских условиях строительная площадка имеет ограниченные размеры и окружена существующими зданиями и инженерными коммуникациями. По этой причине котлованы возводятся с вертикальными откосами, устойчивость которых обеспечивается специальными ограждениями. Несмотря на значительный прогресс в области изучения механики грунтов, развития методов математического моделирования, совершенствования методов планирования, проектирования и строительства, а также более чем 50-ти летний опыт реализации проектов возведения подземных сооружений и котлованов, одной из наиболее сложных задач, с которой сталкиваются участники строительства, является определение наиболее оптимальной конструкции ограждения котлована [3].

Выбор типа и способов сооружения ограждающих конструкций определяется индивидуально для каждого объекта с соблюдением обязательных требований<sup>1</sup> по: обеспечению надежности, долговечности и экономичности на всех стадиях строительства и эксплуатации в соответствии со сроком службы сооружения; обеспечению сохранности и безопасности эксплуатации сооружений окружающей застройки; ограничению по предельно допустимым вредным воздействиям на окружающую среду.

## Методология исследования

Рассмотрены основные типы и методы возведения ограждающих конструкций котлованов в условиях плотной городской застройки. Проведен качественный анализ, построенный на установлении характеристик существующих технологий и условий производства строительно-монтажных работ.

## Обзор существующих решений

Устройство ограждающих конструкций котлованов может быть произведено без разработки грунта (шпунт, сваи), с разработкой грунта под сооружение конструкции (стена в грунте) и путем искусственного улучшения свойств грунтового массива (инъектирование, цементация, замораживание).

---

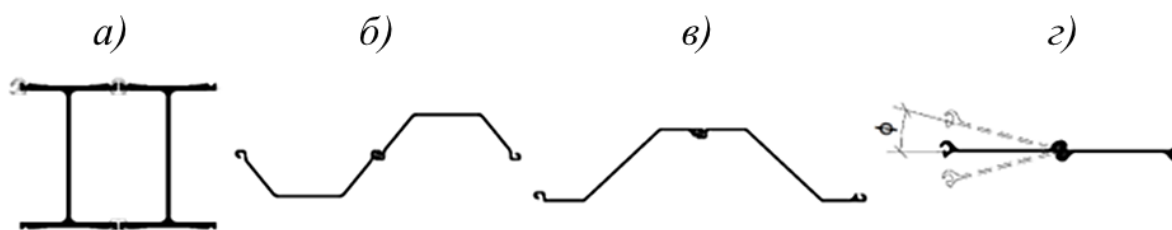
<sup>1</sup> Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

### Ограждения котлованов, сооружаемые без разработки грунта

Ограждения котлованов, сооружаемые без разработки грунта, широко используются в строительстве подземных частей зданий и сооружений различного назначения, в т. ч. в транспортном и гидротехническом строительстве, во всех типах дисперсных и малопрочных скальных грунтов вне зависимости от уровня грунтовых вод.

Сооружаемые ограждения разделяются по типам на: свайные (балочные) и шпунтовые [4]. В отличие от свайных, шпунтовые ограждения способны воспринимать не только давление грунта и передаваемые на грунт нагрузки от строительной техники, складированных материалов и зданий и сооружений, но и являются водонепроницаемыми, т. е. служат противодиффузионной завесой.

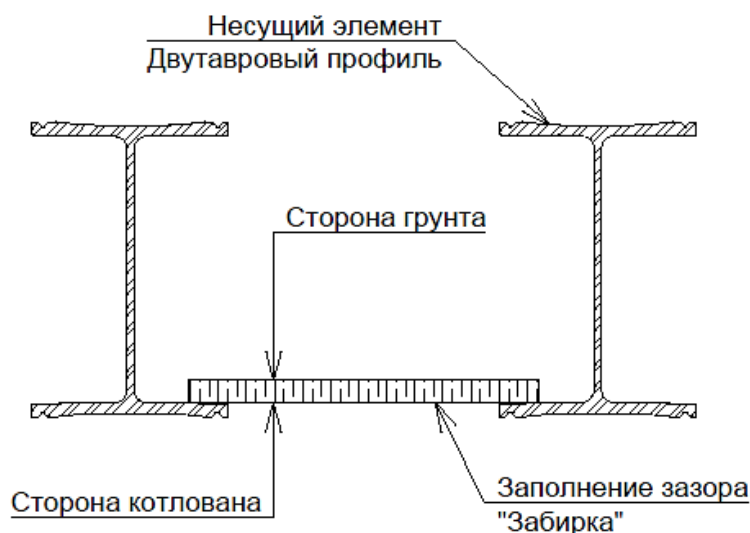
Для изготовления элементов шпунтовых ограждений применяются стальные профили с различным поперечным сечением (U-образным, Z-образным, плоским и из профильных элементов с замковыми соединениями) (рис. 1), а соединения замкового типа по краям профилей гарантируют их плотное прилегание и прочность конструкции.



$\varphi$  — возможный угол отклонения плоского профиля для формирования замкнутых цилиндрических ограждений

**Рисунок 1.** Шпунтовое ограждение: а) двутавровый профиль с замковыми элементами; б) U-образный профиль; в) Z-образный профиль; г) плоский профиль (составлено авторами)

Свайные (балочные) шпунтовые ограждения (рис. 2) представляют собой систему вертикальных элементов, выполненных преимущественно из стали, погружаемых через определенное расстояние между элементами (шаг). Шаг зависит от свойств грунта, глубины котлована и действующих нагрузок. Наиболее распространенными являются элементы из стальных труб и двутавровых прокатных профилей, но также, поскольку к данному типу ограждения не предъявляется требования водонепроницаемости, могут использоваться элементы других сечений и материалов.



**Рисунок 2.** Балочное шпунтовое ограждение (составлено авторами)

Для предотвращения осыпания грунта между шпунтовыми элементами по мере разработки грунта котлована зазор заполняется деревянными досками, стальными листами, либо обетонируется в опалубке или по технологии торкретирования.

Поскольку данный тип ограждения не является водонепроницаемым, использование его в водонасыщенных грунтах требует проведения дополнительных мероприятий по устройству водопонижения. В свою очередь водопонижение грунтовых вод вблизи существующих зданий и сооружений может существенно сказаться на их техническом состоянии вследствие уплотнения грунта и исключения взвешивающего действия воды [5; 6].

Погружение в грунт элементов ограждений, сооружаемых без разработки грунта, осуществляется ударным способом (забивкой), вибропогружением и статическим вдавливанием. Для облегчения процесса погружения совместно с вышеуказанными способами может применяться лидерное бурение скважин.

Забивка элементов осуществляется с помощью дизельных или гидравлических молотов: свая или шпунт погружается в грунт за счет энергии удара, передаваемой через наголовник. Преимущества способа в высокой скорости погружения, возможности работы в плотных, твердых и гравелистых грунтах и относительно низкой стоимости работ. Недостатки — высокий уровень шума и вибрации, а также большая вероятность повреждения замковых элементов, деформации верхней части шпунта и отклонений от вертикали [7].

Вибропогружение один из самых распространенных способов погружения элементов в грунт. Механизм погружения заключается в передаче вибраций различной частоты и амплитуды от вибропогружателя через шпунтовый элемент на грунт, в результате чего происходит его разуплотнение и переход в пластичное состояние, что в свою очередь снижает трение на поверхности контакта грунта со шпунтом. Преимущества заключаются в высокой скорости погружения, особенно в песчаных грунтах, более низком уровне шума и вибрации по сравнению с ударным способом. Недостатки — ограниченная эффективность в плотных глинистых, техногенных и грунтах с включением глыб, валунов, кирпичного и бетонного боя и т. п. [7].

Применение вибропогружения в условиях плотной городской застройки возможно после определения резонансной частоты зданий и сооружений, попадающих в зону влияния строительства [8].

Вдавливание осуществляется с помощью гидравлических установок, которые передают статическую нагрузку от собственного веса на оголовок вдавливаемого элемента, тем самым создавая давление, превышающее сопротивление грунта погружению. Этот метод исключает динамические воздействия на окружающую среду, обеспечивает высокую точность погружения и может применяться в широком диапазоне инженерно-геологических условий. Недостатки — низкая скорость погружения и высокая стоимость оборудования.

В целях снижения сопротивления грунта при погружении элементов, минимизации вибрационного и шумового воздействия, повышения точности монтажа и снижения стоимости до начала производства работ может применяться предварительное бурение лидерных скважин.

Несмотря на множество преимуществ, шпунтовые ограждения имеют определенные ограничения: использование затруднено в грунтах с наличием крупных включений или прослойками скальных пород, из-за относительно низкой жесткости возможно появление избыточных деформаций окружающего грунтового массива. Экономичность наиболее распространенных металлических шпунтовых и свайных ограждений обусловлена возможностью многократного погружения и извлечения элементов. Оборачиваемость при правильных условиях эксплуатации может составлять более 10 циклов [9–11]. Возможность многократного

использования является преимуществом данного типа ограждений, поскольку значительно снижает материалоемкость и соответственно стоимость работ, однако, в условиях подрядного способа производства работ [12] подрядчик, задействованный на сооружении ограждения не может извлечь элементы ограждения и применить их повторно на другом объекте строительства до окончания всех работ нулевого цикла. Данный фактор увеличивает риски для подрядчика и должен быть учтен во взаимоотношениях с заказчиком [13–15].

### *Стена в грунте*

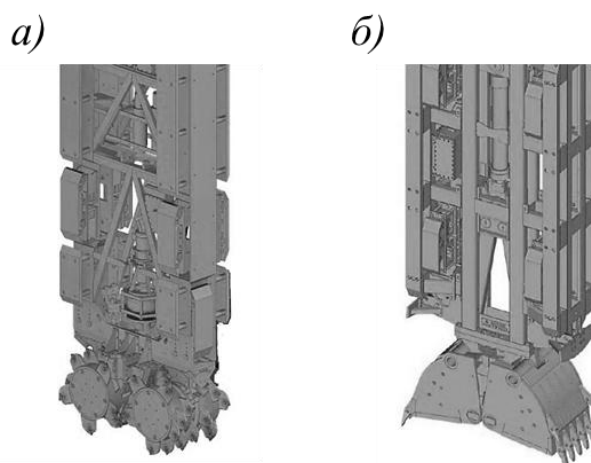
Ограждения котлованов, сооружаемые методом «Стена в грунте» (СВГ), являются наиболее универсальными в условиях плотной городской застройки, могут быть применены в любых инженерно-геологических условиях, обладают наилучшими из рассматриваемых типов ограждений характеристиками по прочности, жесткости и водонепроницаемости, оказывают минимальное влияние на окружающую застройку [16].

Различают два основных вида СВГ: траншейная (ТСВГ) и свайная (ССВГ).<sup>2</sup>

ТСВГ представляет собой монолитную или сборно-монолитную плоскую конструкцию требуемой ширины и глубины, сооружаемую в разработанной специализированным оборудованием траншее.

ССВГ в свою очередь не является плоской, а состоит из ряда монолитных пересекающихся, соприкасающихся или не соприкасающихся по длине буровых свай требуемого диаметра и глубины.

Для сооружения траншейной СВГ применяется специализированное оборудование: траншейная гидравлическая фреза или грейферный ковш. При использовании гидрофрезы (рис. 3 а) грунтовая порода разрушается при помощи вращающихся в противоположных направлениях колес, оборудованных режущим инструментом, перемешивается с бентонитовым раствором и транспортируется центробежным насосом по системе трубопроводов для отделения частиц грунта от бентонитового раствора на комплексе технологического оборудования (бентонитовый завод). При использовании грейферного оборудования (рис. 3 б) порода разрушается и удаляется из траншеи ковшом.



**Рисунок 3.** Оборудование для сооружения траншейной СВГ:  
а) гидравлическая фреза; б) грейферный ковш (составлено авторами)

<sup>2</sup> СТО НОСТРОЙ 2.5.74-2012 Основания и фундаменты. Устройство «Стены в грунте». Правила, контроль выполнения и требования к результатам работ (с Поправкой).

Вне зависимости от типа применяемого оборудования цикл производства состоит из операций по разработке грунта в пределах одного элемента (захватками) армированию и бетонированию. Поочередно изготавливаясь таким образом отдельные стоящие панели образуют единую сплошную стену. Для предотвращения обрушения стенок траншеи по мере разработки грунта, в траншею подается бентонитового раствора (суспензии). Ширина захватки определяется на стадии проектирования с учетом характеристик применяемого оборудования, инженерно-геологических условий, времени монтажа арматурных каркасов и укладки бетонной смеси и в среднем варьируется от 2,5 до 12 м.

По окончании разработки грунта проводится процесс замены смешенного с разработанной породой бентонитового раствора высокой плотности (от 1,1 г/см<sup>3</sup> до 1,4 г/см<sup>3</sup> в зависимости от типа разрабатываемого грунта) на бентонитовый раствор низкой плотности (от 1,04 до 1,10 г/см<sup>3</sup>) [17]. На следующем этапе в траншею при помощи крана устанавливается пространственный арматурный каркас и производится укладка бетонной смеси методом вертикального подъема трубы. По мере бетонирования, более плотная бетонная смесь вытесняет бентонитовый раствор, который при помощи насоса транспортируется на бентонитовый завод, где через систему вибросит и центробежных сепараторов очищается для повторного применения. Производство работ на смежной захватке возможно только после набора бетоном минимальной прочности, устанавливаемой проектом производства работ.

Для предотвращения просачивания грунтовых вод через технологические швы бетонирования смежных захваток в зависимости от применяемого оборудования возможно несколько подходов [18]. При использовании грейферного оборудования границы захваток отделяются металлическими инвентарными ограничителями с возможностью установки в них гидроизолирующих элементов (гидрошпонки). При использовании траншейной гидрофрезы, водонепроницаемость обеспечивается созданием шероховатой поверхности бетона смежной захватки.

Выбор оборудования для разработки грунта в основном зависит от инженерно-геологических условий и глубины траншеи. Гидравлическая фреза в отличие от грейфера может быть применена в скальных и полускальных грунтах, однако при использовании грейфера возможно сооружение значительно более глубоких траншей [19].

В условиях плотной городской застройки наиболее значительным технологическим риском является резкое снижение уровня бентонитового раствора в траншее, например при повреждении в ходе СМР неучтенных инженерных коммуникаций, подземных сооружений или прохождении пластов гравелистых и трещиноватых горных пород. При отсутствии гидростатического давления бентонитового раствора на стенки траншеи, возможно обрушение неустойчивых пород, что в свою очередь может привести к возникновению чрезмерных осадков земной поверхности и заклиниванию оборудования в траншее [20].

В целях увеличения качества строительно-монтажных работ, повышения общей надежности конструкции монолитной СВГ и снижения стоимости реализации проекта в целом, предпринимаются попытки внедрения сборных и сборно-монолитных конструкций [21–25] с использованием предварительно напряженной арматуры, что обеспечивает повышенную прочность, жесткость, трещиностойкость и устойчивость [26].

Формирование свайной СВГ осуществляется путем последовательного изготовления по периметру котлована буровых железобетонных свай. В зависимости от взаимного расположения свай в плане ССВГ классифицируются на стены из бурокасательных, буросекущихся или отдельностоящих свай. Применение того или иного типа ССВГ зависит от конструктивных и технологических требований к ограждению.

Технология устройства буровых свай включает бурение скважины, монтаж арматурного каркаса (в случае применения армированных свай) и укладку бетонной смеси. Извлечение

породы при бурении, как привило, выполняется шнековым буровым инструментом с применением опережающей обсадной трубы для предотвращения обрушения стенок скважины, извлекаемой в процессе бетонирования. Для устройства ограждений котлованов, как правило, используются сваи диаметром от 600 до 1 500 мм.

При устройстве ССВГ из бурящихся свай, в первую очередь устраиваются неармированные сваи-заполнители, которые располагаются с шагом, обеспечивающим требуемый размер подрезки при бурении последующих армированных свай. После набора минимальной прочности бетона неармированных свай приступают к изготовлению армированных смежных свай. Бурение выполняется с учетом подрезки края соседних неармированных свай. По окончании бурения в скважину монтируют арматурный каркас и заполняют бетонной смесью методом ВПТ. На последнем этапе, после заполнения скважины бетонной смесью обсадная труба извлекается.

Выбор типа свай между отдельностоящими, бурокасательными или бурящимися зависит в первую очередь от уровня грунтовых вод и требуемого уровня надежности сооружения. При применении касательных и бурящихся свай особое внимание следует уделять возможным отклонениям продольной оси сваи от вертикального положения с увеличением глубины бурения.<sup>3</sup>

Применение обсадной трубы для бурения скважин позволяет вести работы в любых инженерно-геологических условиях без проведения предварительных работ по водопонижению, закреплению трещиноватых грунтов [27].

Однако, в связи с тем, что в армированной свае распределение рабочей арматуры по окружности не является оптимальным для конструкции, воспринимающей преимущественно изгибающий момент в одной плоскости, для обеспечения равнопрочности конструкции в аналогичных условиях требуется увеличенное количество арматуры и большее поперечное сечение, что приводит к увеличению стоимости строительства [28; 29]. Также большой объем подрезки бетона неармированных элементов в ограждении из бурящихся свай существенно увеличивает материалоемкость изготовления, а большое количество вертикальных швов негативно влияет на водонепроницаемость возводимой конструкции.

Поскольку конструкции ограждения СВГ не имеют возможности извлечения и повторного применения, для снижения стоимости работ по проекту в целом, необходимо рассматривать возможность использования ограждения в качестве фундамента для надземной части здания или постоянных ограждающих конструкций подземной части [30].

В условиях плотной городской застройки при необходимости максимального ограничения возможных деформаций и обеспечении уровня надежности СВГ не имеет альтернативы с другими типами ограждений. Для обеспечения возможности строительства в условиях минимально допустимых осадок совместно с возведением ограждения методом «Стена в грунте» может быть применен метод подземного строительства «Top-Down» [31].

### ***Методы искусственного улучшения свойств грунтов***

К отдельным методам устройства ограждающих конструкций котлована можно отнести искусственное улучшение физико-механических характеристик грунтового массива путем укрепительного инъектирования (цементация, силикатизация), струйной цементации и замораживания.

<sup>3</sup> ТР 100-99. Технические рекомендации по устройству фундаментов из буронабивных свай в условиях существующей застройки. — Правительство Москвы. Комплекс перспективного развития города, 2000.

Укрепительное инъектирование грунтового массива представляет собой нагнетание цементного раствора под давлением, не превышающем давления гидроразрыва пласта. Несмотря на высокую прочность сцементированного грунта без использования армирующих элементов, прочность создаваемого массива не достаточна для восприятия бокового давления при большой глубине котлована. Нагнетание раствора, как правило, сопровождается подъемом земной поверхности, что может негативно сказаться на окружающей застройке [32].

Метод замораживания грунтов заключается в понижении температуры грунта до отрицательных значений, при котором жидкая фаза (вода) переходит в твердое состояние. Для охлаждения грунта используются либо циркулирующий по трубам соляной раствор, либо сухой лед (диоксид углерода), периодически засыпаемый в предварительно пробуренные скважины. Несмотря на высокую прочность ледогрунтового массива (до 15 МПа при испытании на одноосное сжатие [33]) данный метод в связи с технологической сложностью и материальными затратами на обеспечение активной фазы замораживания и поддержания пассивной не применим для котлованов больших размеров. Его использование в грунтах без свободной воды также невозможно [34].

Струйная цементация представляет собой технологию создания грунтоцементных свай (ГЦС) путем разрушения структурных связей грунтового массива и одновременного смешивания высоконапорной струей цементирующего раствора. В результате образуется грунтоцементная свая диаметром от 600 до 2 000 мм [35]. В случае необходимости возможно армирование ГЦС стержневыми элементами из металлического проката или анкерных стержней.

Основной недостаток технологии струйной цементации — возможность изготовления ГЦС только в дисперсных несвязных грунтах, а также большая вероятность локального уменьшения диаметра.

Руководствуясь наличием ограничений технологий устройства ограждающих конструкций котлованов, был произведен сравнительный анализ эффективности использования существующих решений в различных инженерно-геологических и организационно-технологических условиях строительства. Для удобства рассмотрения технологиям были присвоены номера (табл. 1).

**Таблица 1**

**Сравнительный анализ существующих решений**

Извлекаемые конструкции	
1	1.1 Свайные забивные
	1.2 Свайные вибропогружаемые
	1.3 Шпунтовые вибропогружаемые
	1.4 Шпунтовые вдавливаемые
2	Стена в грунте траншейного типа
	2.1 Разработка траншеи грейфером
	2.2 Разработка траншеи фрезой
3	Стена в грунте из буровых свай
4	Специальные методы укрепления грунтов
	4.1 Струйная цементация

*Составлено авторами*

Все рассматриваемые типы конструкций и технологии устройства показывают наилучший результат при условии строительства в дисперсных грунтах: песках различной крупности и влажности, глинах различной плотности и консистенции<sup>4</sup> (табл. 2). Низкая оценка метода статического вдавливания связана с недостаточной производительностью относительно

<sup>4</sup> ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация»

других вариантов погружения. Снижение оценки для всех вариантов устройства СВГ связано с необходимостью периодической очистки рабочего органа от налипшего грунта и, как следствие, увеличением времени цикла. Струйная цементация в связных грунтах практически не используется, требует применения предварительного размыва, и даже в этом случае не гарантирует требуемых качеств грунтоцементных элементов.

Таблица 2

**Сравнительный анализ существующих решений в различных инженерно-геологических условиях**

Грунты		Технологии устройства ограждений котлованов								Эффективность применения
		1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	3	4.1	
Дисперсные	связные	4	4	4	3	4	4	4	1	0 — не используется; 1 — практически не используется; 2 — крайне низкая; 3 — низкая; 4 — высокая; 5 — очень высокая
	несвязные	5	5	5		5	5	4		
Скальные (R <sub>c</sub> > 5 МПа)	монолитные	0	0	0	0	5		4	0	
	трещиноватые					1				
Полускальные (R <sub>c</sub> < 5 МПа)	монолитные	1	0	0	0	2	5	5	0	
	трещиноватые					1	1			
Техногенные с содержанием мусора и крупных включений		3	4	4	2	2	4	5	2	
Специфические (торф, ил, сапрпель)		3	3	3	5	3	3	4	1	

Составлено авторами

Эффективны в скальных и полускальных грунтах варианты сооружения СВГ гидрофрезой и из буровых свай. В трещиноватых грунтах для использования гидрофрезы, как привило, для предотвращения ухода бентонитового раствора из траншеи требуется проведение работ по цементации известняков.

Основной проблемой строительства в техногенных грунтах является большое содержание крупных твердых включений: бетонных конструкций, кирпичей, арматуры, труб и т. д. В условиях городской застройки, особенно в бывших промышленных зонах, мощность техногенных грунтов может быть весьма значительна [36]. На эффективность строительства в таких условиях влияет, как и непосредственно повышенная сложность прохождения включений, так и их неравномерность содержания, что в ходе производства работ может привести к смещению продольной оси элементов ограждения. Наименее подвержены этому влиянию буронабивные сваи.

Таблица 3

**Сравнительный анализ организационно-технологических характеристик устройства конструкций ограждения котлованов**

Характеристики	Технологии устройства ограждений котлованов								Эффективность применения
	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	3	4.1	
Скорость производства работ	5	5	5	3	4	3	3	1	1 — крайне низкая; 2 — низкая; 3 — умеренная; 4 — высокая; 5 — очень высокая
Мобильность машин и оборудования	4	5	5	2	2	2	4	2	
Распространенность оборудования	5	5	5	3	4	1	4	3	
Потребность в площадях для размещения оборудования и складов	4	4	4	3	1	1	4	2	
Материалоемкость	1	1	1	1	3	2	4	5	
Регулярность поставки материалов и конструкций	2	2	2	2	3	3	5	3	
Возможность использования в условиях сложившейся застройки	1	3	3	5	5	5	5	3	

Составлено авторами

Для качественной оценки организационно-технологических характеристик устройства ограждений котлованов проведено сравнение скорости производства работ, мобильности машин и оборудования, распространенности (доступности) оборудования, потребности в площадях для размещения оборудования, материалоемкости, режима (регулярности) поставки материалов и конструкций, возможности применения в условиях плотной городской застройки (табл. 3).

Благодаря высокой производительности машин и минимальному количеству подготовительных работ на строительной площадке по укрупнению свайных и шпунтовых элементов, скорость производства работ по устройству ограждения котлована способами забивки и вибропогружения, как правило, наивысшая. Способ статического вдавливания значительно уступает не только по скорости погружения элементов, но и по времени затрачиваемого на подготовку и перемещение по фронту работ установки для статического вдавливания.

Работы по устройству СВГ более продолжительны поскольку включают большее количество технологических операций. Перед началом производства работ требуется дополнительное время на устройство усиленных технологических дорог, пионерной траншеи (форшахты), сборку и пусконаладку завода по производству и переработке бентонитового раствора.

Обязательным требованием перед началом производства работ по струйной цементации грунтов являются опытные работы, в процессе которых определяются требуемые технологические параметры. Минимальное время необходимое для проведения опытных работ составляет от одного месяца.

При оценке мобильности основных машин и оборудования учитывались габариты, вес, количество и скорость развертывания технологического оборудования. Данный показатель влияет на возможность одновременного использования нескольких машин, что позволит снизить сроки производства работ. Наиболее мобильными являются установки вибропогружения состоящие из вибропогружателя, закрепленного на экскаваторе или подвешенного на кране, и гидравлической станции. Менее мобильным является оборудование для забивки извлекаемых ограждений и изготовления буронабивных свай. Наименьшей мобильностью обладают установки для устройства траншейной СВГ и струйной цементации поскольку требуют большого количества дополнительного технологического оборудования.

Показатель распространенности и доступности оборудования определяет возможность выбора альтернатив среди подрядчиков. Данный показатель оценен исходя из универсальности применения метода, т. е. возможности сооружения конструкций другого назначения, стоимости оборудования, сложности технологических операций с учетом опыта работы в строительной отрасли. Благодаря своей универсальности и невысокой стоимости оборудование для забивки и вибропогружения является наиболее распространенным в строительстве. Несмотря на возможность применения гидрофрезы практически в любых инженерно-геологических условиях, данное оборудование является наиболее дорогим, технически сложным и, как следствие, наименее распространенным.

Размер строительной площадки для размещения оборудования и складов является одним из основных факторов, влияющих на выбор технологии в условиях плотной городской застройки. Такие варианты как забивка, вибропогружение и буровые сваи, минимально зависящие от периферийного технологического оборудования и имеющие возможность изготовления и укрупнения элементов ограждения вне строительной площадки наиболее предпочтительны.

Материалоемкость — один из основных параметров, определяющий стоимость строительства ограждения котлована. Возможность повторного использования элементов ограждения существенно снижает данный показатель. Для неизвлекаемых конструкций, таких как СВГ и ограждение из грунтоцементных элементов материалоемкость зависит от формы поперечного сечения и размера подрезки соседних элементов для обеспечения водонепроницаемости ограждения.

Чем выше требуемая регулярность поставки материалов и конструкций в условиях города, тем больше вероятность возникновения непредвиденных задержек, и, как следствие, увеличение срока строительства. Для конструкций из монолитного железобетона задержки в поставке бетонной смеси могут привести к браку строительной продукции. По этой причине наиболее предпочтительны технологии менее чувствительные к задержкам в поставке материалов и конструкций.

Возможность использования в условиях плотной городской застройки представляет собой интегральный показатель, включающий в себя совокупность таких факторов как степень вибрационного, шумового или физического воздействия на окружающую застройку от работы технологического оборудования.

### Заключение

Строительство в условиях городской застройки связано с большим количеством ограничений, основным из которых является недостаток свободного пространства. В таких условиях устройство котлованов с откосами становится невозможным. Выбор типа и способа сооружения ограждающих конструкций котлована является важным фактором и влияет на весь цикл возведения объекта, а в случае неверной оценки применимости и возможных рисков может привести к задержке в строительстве, перерасходу средств и возникновению аварийных ситуаций.

Разработка методики для выбора оптимальной технологии устройства ограждающих конструкций, позволяющих эффективно организовать строительство заглубленных объектов с учетом ограничений и требований, предъявляемых к ним в условиях городской застройки, позволит минимизировать риски, повысить уровень безопасности и качество работ в котловане.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Теличенко, В.И. Состояние и перспективы освоения подземного пространства г. Москвы / В.И. Теличенко, М.Г. Зерцалов, Д.С. Конюхов // Вестник МГСУ. — 2010. — № 4-4. — С. 24–36.
2. Рудяк, М. Рациональное использование городского подземного пространства для гражданских объектов / М. Рудяк. — Litres, 2022. — 231 с.
3. Колыбин, И.В. Подземные сооружения и котлованы в городских условиях-опыт последнего десятилетия / И.В. Колыбин // М.: Российская геотехника—шаг в XXI век. Труды юбилейной конференции, посвященной. — 2007. — С. 114–153.
4. Чередниченко, Т.Ф. Выбор способа устройства ограждающих конструкций котлована при открытом способе строительства в стесненных условиях / Т.Ф. Чередниченко, Д.П. Снегирев // Физико-математические и технические науки как постиндустриальный фундамент эволюции информационного общества. — 2018. — С. 76.

5. Николаев, А.П. О деформациях в глубоких горизонтах грунтовых массивов на участках водопонижения / А.П. Николаев // Гидрогеология и карстование. — 2009. — № 18. — С. 224–231.
6. Ющубе, С.В. Развитие осадок зданий при понижении грунтовых вод на оползневой территории Лагерного сада в г. Томске / С.В. Ющубе, А.А. Тарасов, А.С. Устюгов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2023. — Т. 25. — № 3. — С. 143–150.
7. Верстов, В.В. Исследование сравнительной эффективности заглубления стального шпунта в плотный грунт различными погружающими машинами / В.В. Верстов, А.Н. Гайдо // Механизация строительства. — 2013. — № 2. — С. 44–49.
8. Верстов, В.В. Уменьшение динамических воздействий на окружающие здания при погружении в грунт вибрационными машинами шпунта и других элементов / В.В. Верстов // Вестник Гражданских Инженеров. — 2012. — № 1(30). — С. 149–153.
9. Барилова, И.В. Резервы снижения экономических затрат времени при возведении фундаментов мелкого заложения / И.В. Барилова, Ю.Г. Москалькова // Проблемы безопасности на транспорте. Материалы IX международной научно-практической конференции. — 2019. — С. 114–153.
10. Лашова, С.С. Сравнительный анализ вариантов устройства ограждения котлована в водонасыщенных грунтах / С.С. Лашова, К.С. Ядовина // Новая Наука: Проблемы И Перспективы. — 2016. — № 121-3. — С. 193–195.
11. Лашова, С.С. Техничко-экономическое сравнение способов создания противодиффузионной завесы при устройстве котлована / С.С. Лашова, К.С. Ядовина, О.В. Петренева // Construction and Geotechnics. — 2016. — Т. 7. — № 3. — С. 91–101.
12. Дьякова, О.В. Традиционные и современные способы организации строительства в рамках развития подходов к управлению строительным производством / О.В. Дьякова, А.В. Александрия, А.В. Щусь // Век качества. — 2020. — № 1. — С. 81–95.
13. Некрасова, М.В. Риски подрядных строительных организаций / М.В. Некрасова, С.В. Калошина // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. — 2016. — Т. 2. — С. 259–265.
14. Деятельность подрядной строительной организации / С. Синенко, А. Лапидус, В. Лучкина, С. Эмба. — Litres, 2024. — 56 с.
15. Голубова, О. Экономика строительства / О. Голубова, Л. Корбан. — Litres, 2022. — 481 с.
16. Larisch, M.D. Modern concrete technology and placement methods and their influence on waterproofing performance of diaphragm walls / M.D. Larisch // Proceedings of the New Zealand Concrete Industry Conference. — 2016. — С. 1–10.
17. Bentonite-loess slurry for construction of diaphragm walls and bored piles / M. Dreger, M. Przygoda, C. Kraszewski [и др.] // Roads and Bridges-Drogi i Mosty. — 2020. — Т. 19. — № 2. — С. 97–106.

18. Puller, M. The waterproofness of structural diaphragm walls. / M. Puller // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering. — 1994. — Т. 107. — № 1. — С. 47–57.
19. Dausch, G. Diaphragm Wall Technique — Planning, Execution and Development over the Last 65 Years / G. Dausch // Recent Developments of Soil Mechanics and Geotechnics in Theory and Practice / ed. T. Triantafyllidis. — Cham: Springer International Publishing, 2020. — Т. 91. — С. 347–354.
20. Mohamed, A. Effect of groundwater table rising and slurry reduction during diaphragm wall trenching on stability of adjacent piles / A. Mohamed // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2015. — Т. 26. — С. 012012.
21. Pan, W. Novel discrete diaphragm system of concrete high-rise modular buildings / W. Pan, Z. Wang, Y. Zhang // Journal of Building Engineering. — 2022. — Т. 51. — С. 104342.
22. Low-carbon efficiency assessment for Hong Kong’s oceanic artificial cities applying the novel prefabricated diaphragm wall technology / K. Chen, T. Qiu, X. Chen [и др.] // Journal of Building Engineering. — 2024. — Т. 84. — С. 108545.
23. Full-scale experiments and modeling of precast two-wall-in-one diaphragm wall components for oceanic artificial cities / T. Qiu, X. Chen, D. Su [и др.] // Ocean Engineering. — 2023. — Т. 288. — С. 116074.
24. Experimental study and resilience modeling for prefabricated hollow diaphragm walls of full-assembled underground stations under urban multi-disturbance conditions / T. Qiu, X. Sun, X. Chen [и др.] // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2023. — Т. 135. — С. 105044.
25. Experimental investigation and mechanical model for assembled joints of prefabricated two-wall-in-one diaphragm walls / T. Qiu, J. Zhang, X. Chen [и др.] // Engineering Structures. — 2023. — Т. 275. — С. 115285.
26. Джантимиров, Х.А. Концепция строительства подземного комплекса в акватории водоотводного канала в Москве. Новые геотехнические технологии для реализации проекта строительства комплекса / Х.А. Джантимиров, В.А. Китайкин // Вестник НИЦ Строительство. — 2014. — № 10. — С. 36–42.
27. Тилинин, Ю.И. Устройство глубоких котлованов в слабых грунтах с применением технологии «стена в грунте» и стены из буросекующих свай на примере объектов Санкт-Петербурга / Ю.И. Тилинин, В.С. Казанбаева, А.В. Климова // The Scientific Heritage. — 2018. — № 28-1 (28). — С. 3–6.
28. Structural behavior of small-scale reinforced concrete secant pile wall / M.T. El-Nimr, A.M. Basha, M.M. Abo-Raya, M.H. Zakaria // World Journal of Engineering. — 2023. — Т. 20. — № 4. — С. 732–745.
29. Model Test on Lateral Loading Performance of Secant Pile Walls / S.-M. Liao, W.-L. Li, Y.-Y. Fan [et al.] // Journal of Performance of Constructed Facilities. — 2014. — Т. 28. — № 2. — С. 391–401.
30. Performance Analysis of Axially Loaded Secant Pile Wall Embedded in Sand: An Experimental Investigation / A.M. Basha, M.H. Zakaria, M.T. El-Nimr, M.M. Abo-Raya // Arabian Journal for Science and Engineering. — 2023. — Т. 48. — № 10. — С. 13005–13029.

31. Зуев, С.С. Опыт использования метода "up-down" при строительстве подземной и надземной части здания / С.С. Зуев, О.А. Маковецкий // Жилищное строительство. — 2019. — № 9. — С. 24–30.
32. Ибрагимов, М.Н. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов / М.Н. Ибрагимов, В.В. Семкин. — АСВ, 2012. — 256 с.
33. Стабилизация грунта методом искусственного замораживания / Т.М. Мадьяров, В.А. Костырченко, В.О. Довбыш, А.Э. Бранд. — Текст: электронный // Проблемы функционирования систем транспорта. — 2014. — С. 20–25. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23259169> (дата обращения: 22.01.2025).
34. Николаев, П.В. Опыт и перспективы развития ресурсосберегающих технологий замораживания грунтов в городском подземном строительстве / П.В. Николаев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — № 2. — С. 367–371.
35. Тер-Мартirosян, З.Г. Усиление слабых грунтов в основании фундаментных плит с использованием технологии струйной цементации грунтов / З.Г. Тер-Мартirosян, П.В. Струнин // Вестник МГСУ. — 2010. — № 4-2. — С. 310–315.
36. Огородникова, Е.Н. Техногенные грунты / Е.Н. Огородникова, С.К. Николаева. — 2-е издание, переработанное и дополненное. — Москва: Российский университет дружбы народов (РУДН), 2017. — 636 с.

**Markov Ivan Vladimirovich**

«Mosinzhproekt» JSC, Moscow, Russia  
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia  
E-mail: Markov\_iv@bk.ru

**Pugach Evgeniy Mihailovich**

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia  
E-mail: tsp-tvz@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2832-1941>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=416367](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=416367)

## Engineering aspects of retaining structures for deep excavations in dense urban environment

**Abstract.** This article examines the technologies and construction specifics of excavation pit retaining structures, including those installed without soil excavation (such as sheet piles and piles driven by impact, vibro-driving, and static pressing), structures constructed with prior soil excavation (diaphragm walls), and methods involving artificial ground improvement (jet grouting). The feasibility of applying these retaining systems under various hydrogeological conditions is also analyzed. Considering the technological constraints of different retaining structure installation methods, a comparative analysis was conducted to evaluate the efficiency of existing solutions under diverse geotechnical and construction conditions. All examined structure types and installation techniques are well-suited for soft soils. However, static pressing exhibits lower productivity, while the diaphragm wall method requires extended cycle times due to the need for excavation equipment maintenance. The application of jet grouting is limited to non-cohesive soft soils. To assess the organizational and technological characteristics of retaining structures, a comparative evaluation was carried out based on construction speed, equipment mobility, availability of machinery, site space requirements, material consumption, supply chain reliability, and feasibility in dense urban environments. Pile driving and vibro-driving methods demonstrated high production rates, whereas static pressing was significantly slower. Diaphragm wall construction and jet grouting require prolonged execution due to numerous preparatory and operational processes. The highest mobility was observed in vibro-driving equipment. Driven piles, vibro-driven piles, and bored piles, which rely minimally on peripheral equipment and allow for off-site prefabrication and assembly, were identified as the most suitable solutions in dense urban environments.

**Keywords:** deep excavation retaining structures in dense urban environment; sheet pile retaining systems; pile driving; vibro-driving of sheet piles; static pile pressing; diaphragm wall; jet grouting of soils