

УСТРОЙСТВО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ЗАВЕСЫ С ПОМОЩЬЮ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТА

А.Г. Малинин, канд. техн. наук,
технический директор ЗАО «ИнжПроектСтрой»,
член Правления Тоннельной ассоциации России,
П.А.Малинин, инженер

Технология струйной цементации грунтов находит все более широкое применение при решении различных задач подземного строительства. Сущность технологии описана в статьях автора [1,2]. В настоящей статье приводится обоснование и опыт применения технологии для устройства горизонтальных противοфильтрационных завес.

Введение.

В настоящее время при строительстве глубоких котлованов или вертикальных выработок в обводненных грунтах наиболее широкое распространение получил способ, основанный на предварительном сооружении «стены в грунте» или опускной крепи до глубины залегания слоя естественного водоупора. В этом случае дальнейшая разработка грунта ведется под защитой водонепроницаемого ограждения и, как правило, не представляет никаких сложностей.

Иная ситуация наступает, когда естественный водоупор отсутствует или когда он находится на значительной глубине, при которой его достижение ограждающими конструкциями становится экономически нецелесообразным. До недавнего времени в этом случае применяли методы водопонижения, которые часто бывали неэффективными при высоких фильтрационных характеристиках грунтов или становились опасными в связи с суффозионными процессами, негативно влияющими на фундаменты близко расположенных зданий и сооружений.

Сегодня в мире и нашей стране появилась технология, позволяющая эффективно решать данный класс задач. Речь идет о технологии струйной цементации грунтов, с помощью которой создается искусственный слой водоупора – горизонтальная противοфильтрационная завеса (ПФЗ).

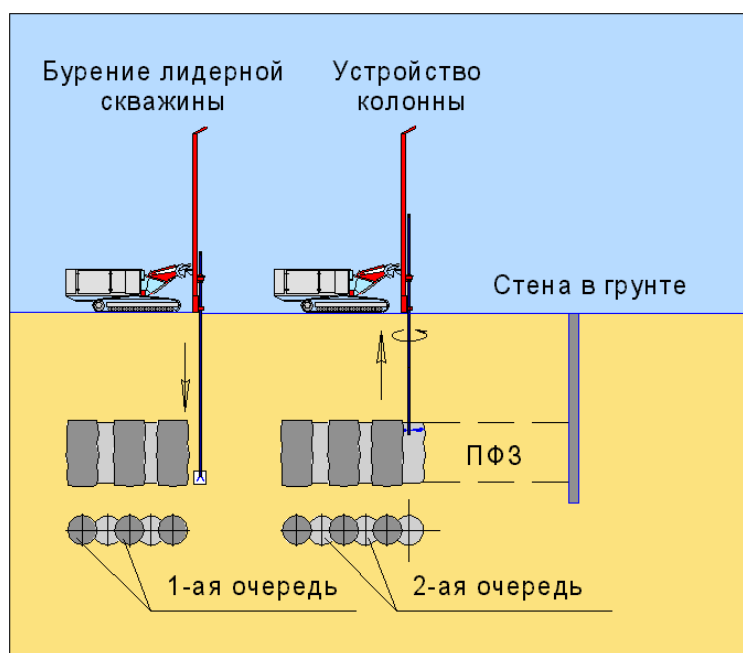


Рис.1. Схема создания грунтоцементных свай.

1. Сущность технологии.

Сущность технологии заключается в разрушении грунта высоконапорной струей цементного раствора с одновременным перемешиванием грунта с цементным раствором. В результате в грунтовом массиве образуются колонны из нового материала – грунтобетона, обладающего высокими прочностными и противодиффузионными характеристиками.

Устройство горизонтальных завес стало эффективным с помощью данной технологии по нескольким причинам. Во-первых, технология дает возможность сооружения грунтоцементных колонн в «утопленном» высотном положении. Для этого в процессе прямого хода бурят скважину до проектной отметки подошвы ПФЗ, включают высоконапорную подачу цементного раствора и начинают подъем буровой колонны с одновременным ее вращением. При достижении проектной отметки кровли ПФЗ подачу цементного раствора прекращают, а буровой инструмент извлекают на поверхность.

Вторым преимуществом технологии является возможность создания сплошных грунтовых массивов, состоящих из взаимно секущихся грунтоцементных колонн. Для этого устройство сплошного тела завесы разбивают на этапы. Например, при двух этапах устройство колонн выполняют не подряд, а через одну колонну. После твердения грунтоцемента возвращаются к началу участка и выполняют устройство пропущенных колонн. В этом случае струя цементного раствора «сканирует» поверхность ранее выполненных колонн, обеспечивая абсолютно полное примыкание к ним новой колонны. Схема, иллюстрирующая сущность технологии и порядок устройства колонн, показана на рис.1.

2. Расчет и проектирование.

Расчет ПФЗ включает проверку на всплытие и прочность. Кроме того, при проектировании завес особое внимание следует уделять расположению устьев скважин с точки зрения обеспечения однородности конструкции.

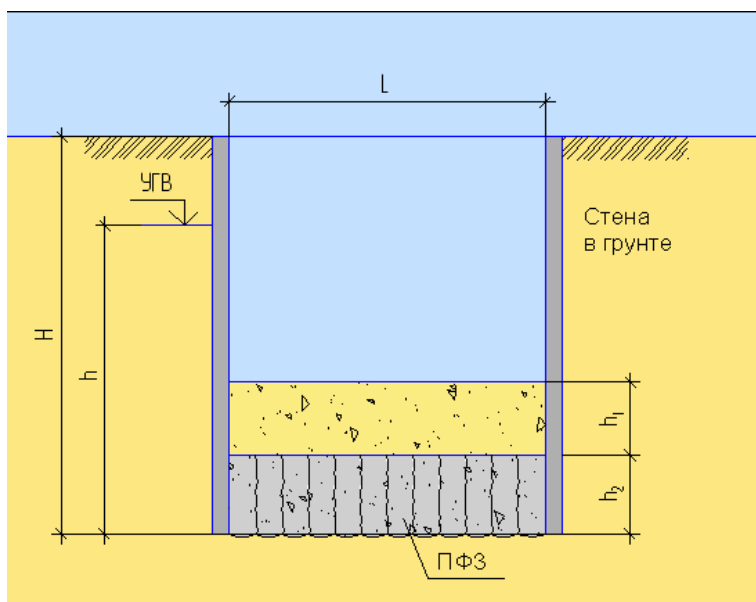


Рис.2. Расчетная схема.

2.1. Проверка на всплытие.

Для схемы, приведенной на рис.2, коэффициент надежности от всплытия может быть рассчитан по формуле

$$k = (h_1 \gamma_s + h_2 \gamma_j + f h_2 u / A) / (h \gamma_w) \quad (1)$$

где γ_s – удельный вес пригрузочного слоя грунта мощностью h_1 , расположенного над ПФЗ,

γ_j – удельный вес грунтобетона мощностью h_2 ,

γ_w – удельный вес воды,

h – превышение уровня грунтовых вод над подошвой ПФЗ,

f – удельная сила трения боковой поверхности завесы по внутренней поверхности ограждения котлована,

u, A – периметр и площадь завесы.

В первом приближении в качестве удельной силы трения можно принять величину сцепления грунтобетона. В зависимости от степени ответственности сооружения коэффициент надежности принимают в диапазоне 1,1 – 1,3.

2.2. Проверка прочности конструкции.

Основной нагрузкой, действующей на противофильтрационную завесу, является гидростатическое давление воды, действующее на подошву противофильтрационной завесы. Иногда результирующую нагрузку удается уменьшить за счет веса пригрузочного слоя, расположенного над ПФЗ.

Так как грунтобетон, как правило, имеет низкую прочность на растяжение, то наибольшую опасность представляют растягивающие напряжения, которые появляются в состоянии изгиба тела завесы.

В общем случае определение напряженно-деформированного состояния тела ПФЗ требует решения пространственной задачи. Однако в тех случаях, когда толщина конструкции на порядок меньше ее представительного размера (ширины прямоугольного котлована или диаметра кругового котлована) задачу можно решать с использованием формул, описывающих чистый изгиб балки.

Максимальные растягивающие напряжения, появляющиеся при изгибе балки прямоугольного сечения со свободно опертыми концами, могут быть рассчитаны по формуле:

$$\sigma = 0.75q(L/h_2)^2 \quad (2)$$

С целью снижения неоправданно высокого запаса прочности А. Garassino в работе [3] предложил учесть боковое давление грунта. Применительно к расчетной схеме, показанной на рис.2, растягивающие напряжения могут быть уменьшены на величину дополнительных сжимающих напряжений

$$\sigma = 0.75q(L/h_2)^2 - \gamma_{sw}(H - h_2/2) \quad (3)$$

где γ_{sw} – удельный вес окружающего грунтового массива.

Подобный подход прост в реализации, но, как указывалось выше, является справедливым только для тонких ПФЗ. Между тем, на практике чаще встречаются случаи, когда толщина завесы сопоставима с ее размерами в плане. Необходимость устройства более мощных завес часто следует из расчета на всплытие или объясняется недостаточно высокими прочностными характеристиками грунтобетона.

При увеличении толщины завесы ее напряженно-деформированное состояние отличается от состояния чистого изгиба. В этом случае анализ напряжений может быть выполнен только с применением численных методов.

Сопоставление рассмотренных подходов выполним на примере расчета горизонтальных напряжений в теле противофильтрационной завесы. Размеры моделируемой завесы соответствуют выполненному реальному проекту работ по устройству ПФЗ котлована станции «Площадь им. Тукая» строящегося метрополитена в г. Казани. Протяженный котлован шириной 20 м и глубиной 12 м строится в обводненных песках и супесях под защитой «стены в грунте» из сборных железобетонных блоков

длиной 18 м и толщиной 0,6 м. Грунтовые воды встречены на 2,5 м ниже поверхности земли. Мощность ПФЗ составляет 3,0 м. Устойчивость «стены в грунте» обеспечивается двумя ярусами расстрелов из труб большого диаметра, а также защемлением блоков в грунт на глубину 6 м ниже лотка котлована (фото 1, 2).



Фото 1. Котлован станции метро «Площадь Тукая» в г. Казани.



Фото 2. Устройство горизонтальной противофильтрационной завесы в днище котлована.

Высокая жесткость «стены в грунте» вносит существенные изменения в расчетную схему задачи. Во-первых, можно считать, что через жесткую ограждающую конструкцию боковое давление грунта не передается на тело завесы. Во-вторых, деформирование боковых областей завесы происходит в условиях ограничения радиальных перемещений, направленных от центра завесы в сторону «стены в грунте». При этом перемещения,

направленные к центру, ничем не лимитируются, а определяются в ходе решения задачи. Особенностью такой постановки является то, что участок, на котором действуют ограничения для радиальных перемещений, заранее не известен, а определяется в процессе решения задачи.

Итерационная процедура задания граничных условий состоит в следующем. На первом шаге закрепляется только верхний угловой узел и выполняется решение задачи в перемещениях. На втором шаге для всех боковых узлов, вектор перемещений которых направлен от центра расчетной области, записываются граничные условия в виде нулевых горизонтальных перемещений и решение задачи повторяется. Процедура продолжается до тех пор, пока не исчезнут все узлы с перемещениями, направленными от центра завесы.

На рис.3 приведены поля горизонтальных напряжений для всех вышерассмотренных схем. В связи с симметрией задачи приведены только правая половина расчетной области.

Первое поле изолиний соответствует чистому изгибу балки с симметричным расположением зон растяжения и сжатия. Максимальные растягивающие напряжения, полученные с применением метода конечных элементов, составили 4,11 МПа, что всего на 1,5 % отличается от точного решения задачи в соответствии с формулой (2).

Второе поле соответствует подходу с учетом действия бокового давления. В данном случае область растягивающих напряжений сократилась, но величина этих напряжений снизилась всего до 3,87 МПа. Уменьшение с предыдущим решением составило всего 5,7%.

Третье поле соответствует решению задачи о напряженном состоянии завесы в условия бокового ограничения радиальных перемещений. При такой постановке задачи произошло значительное снижение не только области растягивающих напряжений, но и их величины до 1,64 МПа. По сравнению с первой схемой снижение составило более 60%.

Рассмотренные примеры показывают, что расчет напряженно-деформированного состояния завес с помощью удобных и простых формул сопротивления материалов таит в себе опасность получения результатов с неоправданно высоким (в 2,5-3 раза) запасом прочности. Но главное, что обеспечение такого высокого уровня прочности на растяжение грунтобетона может быть просто не достигнуто на практике. Это еще раз подчеркивает необходимость использования современных, но хотя и более сложных методов расчета, адекватно моделирующих напряженно деформируемое состояние завесы.

3. Обеспечение однородности конструкции.

Все предыдущие прочностные расчеты были основаны на том, что завеса выполнена из однородного материала. На самом деле завеса выполняется дискретным образом из одиночных грунтоцементных колонн. Поэтому достижение однородности конструкции является достаточно сложной технологической задачей.

Теоретически сплошность конструкции должна обеспечиваться взаимным пересечением сечений цилиндрических колонн в плане. В этом случае шаг расположения устьев скважин I рассчитывается в зависимости от диаметра колонн D . На небольшой глубине шаг между осями грунтоцементных колонн практически равен проектному шагу между устьями лидирующих скважин. Однако с увеличением глубины устройства завесы ситуация усложняется и на первый план выходит иной, более важный фактор – отклонение оси скважин от вертикали, которое может происходить по многим причинам.

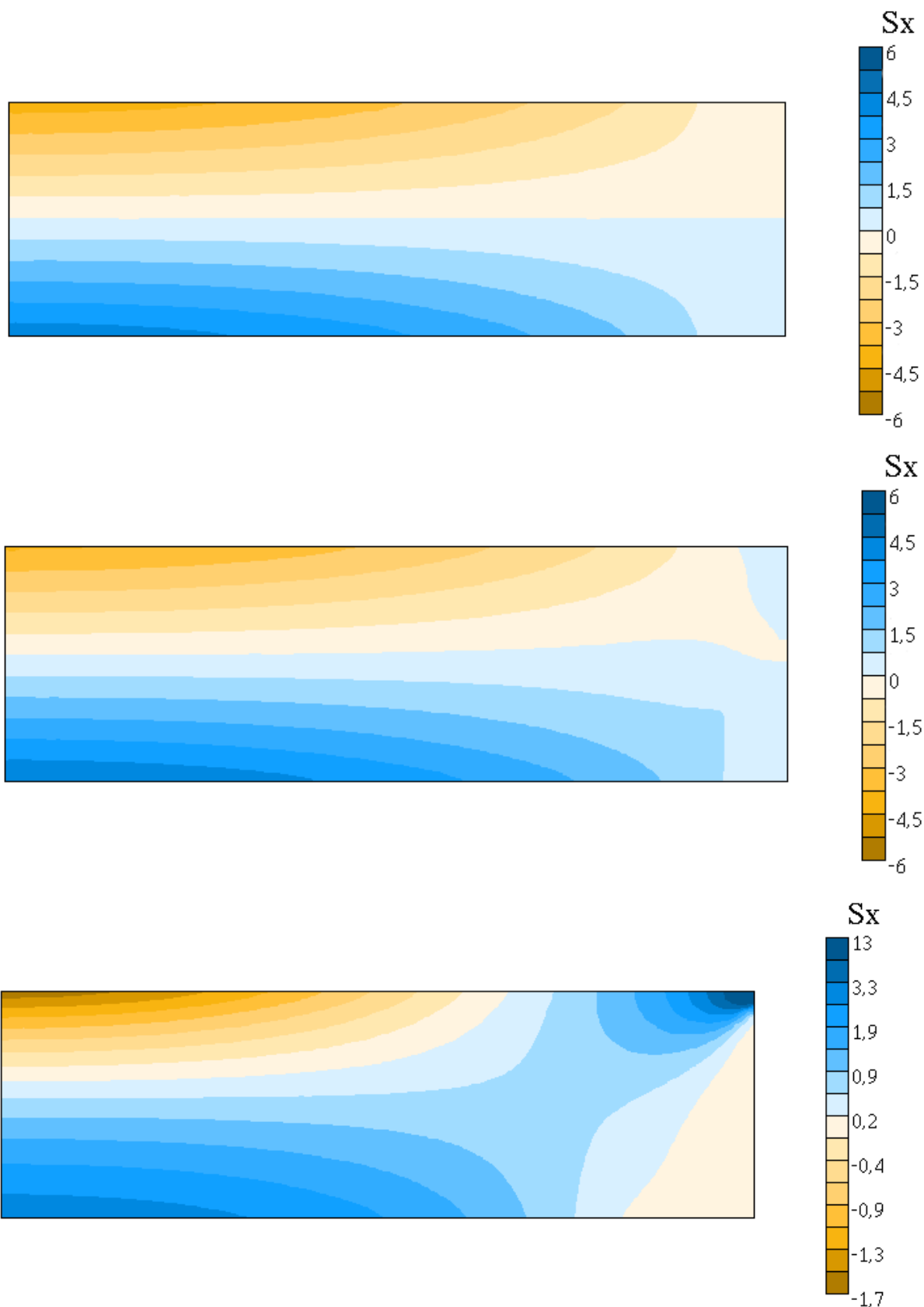


Рис.3. Распределение горизонтальных напряжений в теле противофильтрационной завесы (показана только правая половина расчетной области):
 а) в состоянии чистого изгиба; б) то же с учетом боковых сжимающих напряжений;
 в) в условиях ограниченных радиальных деформаций на боковой поверхности завесы.
 Коричневым цветом показана зона растягивающих напряжений, синим – сжимающие напряжения.

В однородных грунтах отклонения являются минимальными, в неоднородных грунтах или в условиях городского строительства, когда верхний техногенный слой мощностью в несколько метров, как правило, содержит включения строительного мусора или остатки фундаментов ранее стоящих зданий, отклонения достигают значительных величин. Если данный фактор не учитывать в процессе проектирования работ, то последствия, показанные на рис.4, приведут к потере сплошности, противofильтрационной способности и, главное, к разрушению конструкции ПФЗ.

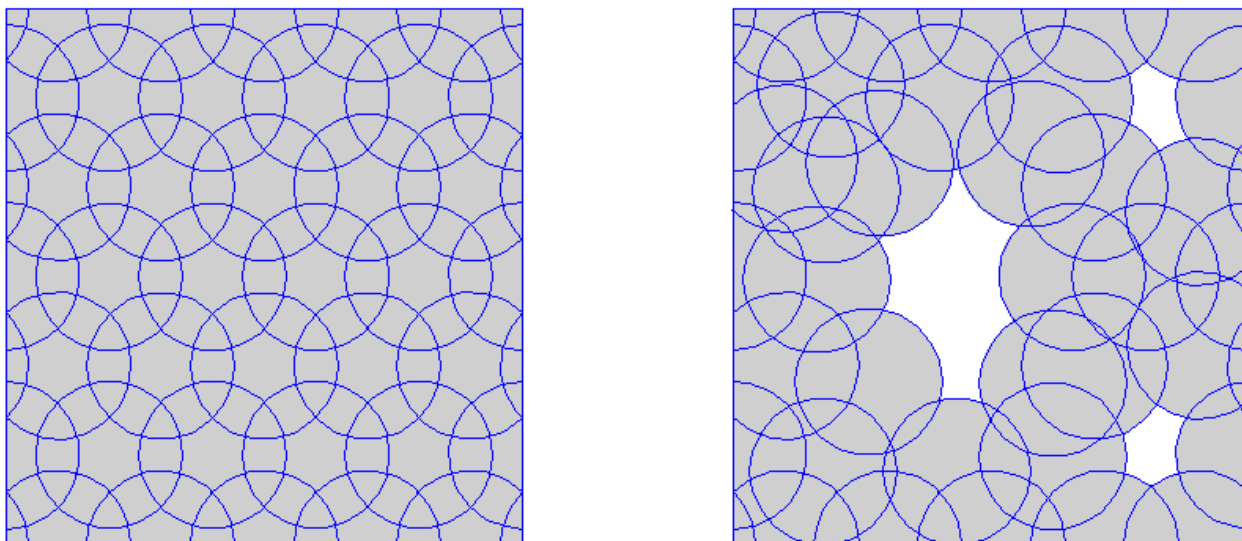


Рис.4 Проектное и фактическое расположение колонн.

По результатам измерений, опубликованным в монографии [4], установлено, что даже в самом лучшем случае при бурении в однородных песках среднее отклонение оси скважин от вертикали составляет 0,8%.

На рис.5 приведена схема расчета предельной глубины бурения скважин в зависимости от диаметра колонн и возможного отклонения оси скважины от вертикали. Из геометрических построений следует, что предельная глубина H может быть рассчитана по формуле:

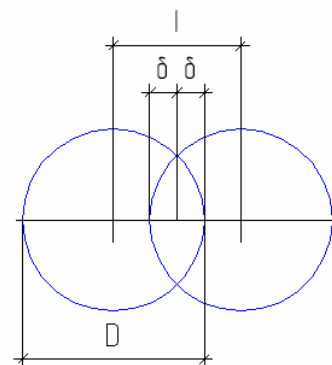
$$H = (D - I) / 2\delta,$$

где D – диаметр грунтоцементной колонны,

I – расстояние между осями скважин,

δ – среднее отклонение центра забоя скважины

от проектной вертикальной оси.



На рис.6 показан график зависимости предельной глубины бурения от отклонения оси скважин от вертикали. Для удобства анализа все величины приведены в относительном виде (по отношению к диаметру колонн), а отклонение от вертикали приведено в процентном выражении $\Delta = 100\delta$, (%).

Анализ графиков показывает, что при отклонениях оси скважин от вертикали всего на 1 градус ($\Delta = 0,02$) устройство противofильтрационных завес с помощью технологии Jet1 (диаметр колонн 0,7-0,8 м) даже при сравнительно высоком взаимном сечении колонн $I/D = 0,7$ ограничивается глубинами всего 6-8 м.

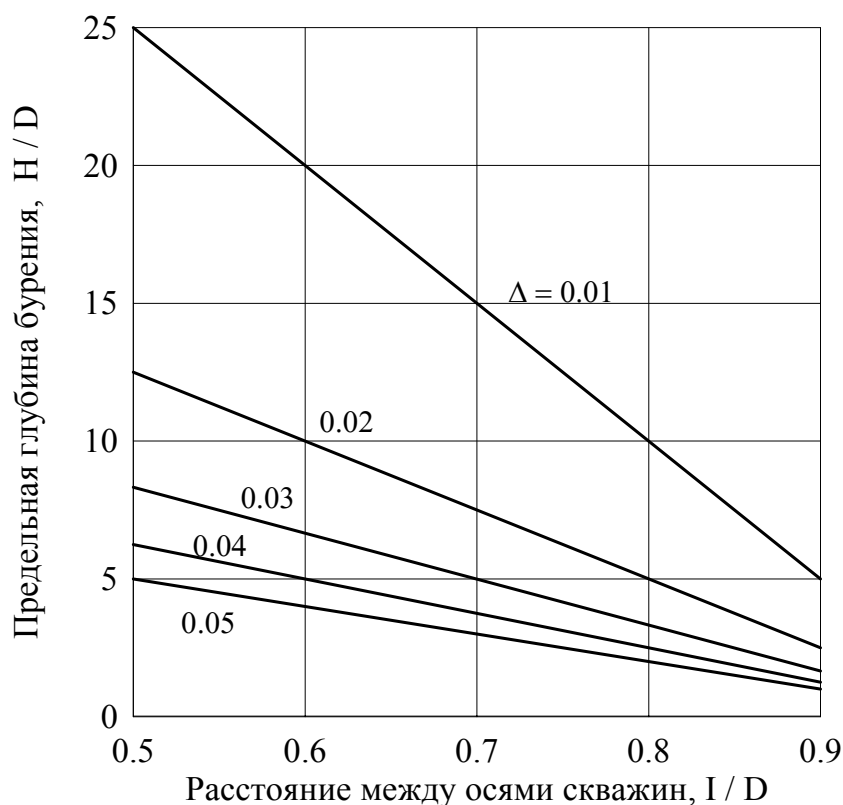


Рис.6. Зависимость глубины бурения скважин от расстояния между скважинами для различных величин отклонения оси скважины от вертикали.

Для обеспечения сплошности для более глубоких котлованов может быть использована только технология Jet2, позволяющая создавать колонны диаметром 1,2-1,5м.

Литература.

1. Малинин А.Г. Применение струйной цементации грунтов в подземном строительстве // Подземное пространство мира. 2000, №2.
2. Малинин А.Г. Применение технологии струйной цементации грунтов в транспортном строительстве // Метро и тоннели. 2001, №6.
3. Garassino A. Design procedures for jet-grouting // Seminar on jet grouting, Singapore, 1977.
4. Bringiotti M., Bottero D. Consolidamenti & Fondazioni. Guida alle moderne metodologie di stabilizzazione e rinforzo dei terreni. Edizioni PEI Srl, Parma, 1999.

Контактные телефоны: (3422) 196-103, 196-361
 Официальный сайт в Интернете: www.jet-grouting.ru