

ЦЕМЕНТАЦИЯ ГРУНТОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НАКЛОННОГО СТВОЛА В ЗОНЕ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

А. Г. Малинин, технический директор ЗАО «ИнжПроектСтрой», к. т. н.
П. А. Малинин, ведущий инженер-геотехник

Введение

Проектом реконструкции шахты «Заполяная» в г. Воркуте предполагается строительство наклонного ствола, соединяющего горные транспортные выработки с расположенной на поверхности центральной обогатительной фабрикой (ЦОФ «Печорская»).

Угол наклона ствола составляет 12° с горизонтом.

На основе инженерно-геологические изысканий установлено, что на начальном участке строительства грунтовый массив до глубины 70–80 м представлен верхнечетвертичными отложениями – преимущественно песками различной крупности (от пылеватых до гравелистых) с прослоями супесей, суглинков и гравия. Ниже песков залегают глины от мягкопластичной до тугопластичной консистенции.

Подавляющая часть площадки строительства обогатительной фабрики сложена вечномерзлыми грунтами, однако на участке выхода наклонного ствола на поверхность вскрытая толща верхнечетвертичных отложений при достигнутой глубине разведочного бурения 35–40 м представлена тальми грунтами (рис. 1).

Воды вскрытого горизонта безнапорные и слабонапорные, но это целостный водоносный горизонт, т. к. выдержанных водупоров в песчано-гравийной толще нет, и воды разных скрытых уровней имеют единую гидравлическую связь.

До глубины уровня грунтовых вод 6 м начальный участок наклонного ствола был проведен открытым способом. Дальнейшее строительство в связи с обводненностью и несвязностью грунтов потребовало применения специальных технологий.

Сравнение способа замораживания и цементации показало, что на начальном периоде сооружения ствола до достижения глу-

бин 30–40 м экономически наиболее целесообразным является применение горного способа проходки под защитой замкнутого грунтобетонного ограждения, устроенного по технологии струйной цементации.

Проектирование

В связи с тем, что струйная технология используется в нашей стране сравнительно недавно и пока не существует отечественного опыта ее применения на больших глубинах, специалистами предприятия была проделана большая работа по изучению имеющегося мирового опыта в реализации подобных проектов.

Анализ показал, что при глубинах 30–40 м наиболее эффективно выполнять цементацию грунтов с поверхности земли, что в отличие от их закрепления из забоя ствола имеет значительные преимущества – возможность параллельно вести закрепление грунтов и проходку ствола, высокая производительность, применять одновременно несколько установок и т. д.

С целью упрощения производства работ участок строительства тоннеля длиной 65 м был разделен на семь заходок, в каждой из которых геометрические параметры ограждения, такие как его толщина в боковых стенах, кровле и почве, имели постоянное значение.

Длина первой заходки, объединяющей грунтобетонное ограждение с существующим стволом, раннее построенным открытым способом, составляла 5 м, остальные имели длину по оси ствола – 10 м.

С помощью метода конечных элементов для каждой заходки был выполнен численный анализ напряженно-деформированного состояния грунтобетонного ограждения в зависимости от величины действующего давления окружающего грунта, деформаци-

онных и прочностных характеристик грунтобетона.

Несущую способность укрепленной области грунтов оценивали с помощью критерия Мизеса-Шлейхера-Боткина:

$$\tau_i \leq C + \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где τ_i – интенсивность касательных напряжений,

σ_0 – среднее (гидростатическое) напряжение,

C – сцепление,

φ – угол внутреннего трения грунтоцемента.

Параметры критерия прочности Мизеса-Шлейхера-Боткина вычисляли, используя значения прочности грунтоцемента при сжатии и растяжении:

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{\sigma_{сж} - \sigma_p}{\sigma_{сж} + \sigma_p}, \quad C = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{сж} \sigma_p}{\sigma_{сж} + \sigma_p}. \quad (2)$$

Из существующего опыта прочность при растяжении в первом приближении можно определить через значение прочности на сжатие:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{сж}}{10}. \quad (3)$$

Фактический расчетный коэффициент запаса прочности устанавливали следующим образом:

$$k = \frac{C + \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi}{\tau_i}. \quad (4)$$

Рис. 1. Принципиальная схема цементации грунтов вокруг наклонного ствола

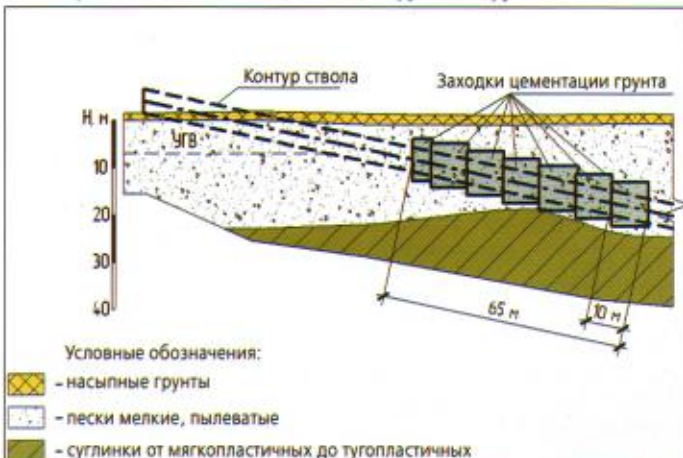
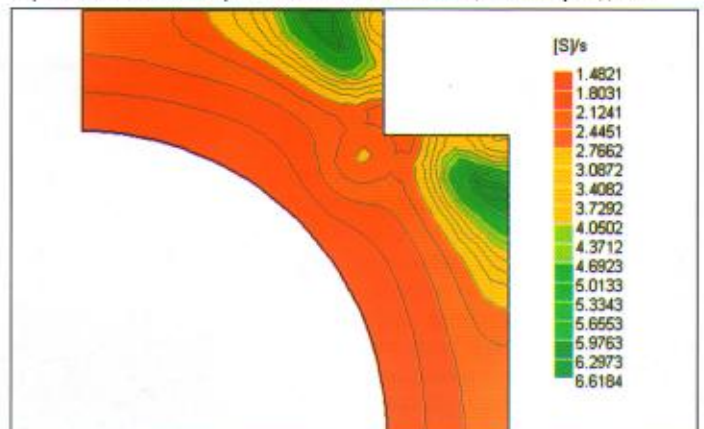


Рис. 2. Распределение значений коэффициента запаса прочности по критерию Мизеса-Шлейхера-Боткина по сечению защитного ограждения



Поле распределений коэффициента запаса в одном из сечений ограждающей конструкции показано на рис. 2. В связи с осевой симметрией задачи рассматривали четверть расчетной области.

Анализ результатов показывает, что в наиболее опасном напряженном состоянии находится внутренний контур ограждения, где коэффициент запаса имеет наименьшее значение.

В дальнейшем при проектировании толщина зоны укрепления подбиралась таким образом, чтобы коэффициент запаса прочности по критерию (4) был не менее $k = 1,5$.

Диаметр колонн и прочность грунтоцемента были приняты по аналогии с ранее выполненными объектами в сходных геологических условиях. В песчаных грунтах диаметр с некоторым запасом принят 1400 мм, а гравийном пласте (заходка № 5) – 1500 мм.

Прочность грунтоцемента в песчаных грунтах была принята 10 МПа, в гравийных – 12 МПа.

Многочисленные исследования авторов показали, что в связи с достаточно высокой неоднородностью грунтоцемента, коэффициент надежности при переходе от нормативного к расчетному значению прочности при сжатии образцов должен составлять не менее $\gamma_g = 2,0$. В этом случае расчетную прочность грунтоцемента в песчаных грунтах принимали равной 5 МПа, а в гравии – 6 МПа.

На основе исходных данных были выполнены расчеты геометрических параметров зоны цементации вокруг наклонного ствола для каждой заходки.

В связи с тем, что ограждение устраивается из конечного числа грунтоцементных колонн, методика его расчета для каждой заходки состояла из следующих этапов.

1. Определение минимальной толщины ограждения в зависимости от глубины заложения ствола и расчетной прочности грунтоцемента.

2. Назначение шага колонн с учетом возможного отклонения оси скважин (колонн) от вертикали при максимальной глубине бурения лидерных скважин.

3. Конструктивное определение количества грунтоцементных колонн из условия, что проектная толщина фактического ограждения должна быть больше величины, установленной в расчете. Отметим, что проектную толщину вычисляли в «замковом» сечении поперечного ряда пересекающихся колонн.

4. Поверочный расчет коэффициента запаса при проектной толщине ограждения.

В табл. 1 приведены конечные результаты назначения проектных параметров устройства ограждения – диаметр и шаг колонн, толщина ограждения в боках, кровле и почве выработки.

В последнем столбце приведено значение максимальной глубины бурения – чрезвычайно важного параметра, определяющего не только техническую возможность производства работ, но и шаг колонн, обеспечивающий их пересечение при возможном расхождении.

Отметим, что мощность ограждения в кровле выработки дополнительно увеличивали с целью предотвращения возможных негативных процессов, связанных с её обрушением.

На основе результатов численного моделирования был подготовлен рабочий проект по устройству грунтобетонного ограждения из секущихся грунтоцементных колонн, включающий параметры производства работ на каждой заходке – глубину бурения, длину грунтоцементной колонны, диаметр и шаг колонн.

На рис. 3, 4, 5 показаны сечения ограждения одной из заходок.

С целью подтверждения проектной прочности, а также скорости твердения грунтобетона в лабораторных условиях были изготовлены образцы-кубики размером $100 \times 100 \times 100$. Их замешивали из песчаного грунта, добытого из разведочных скважин, и цемента ПЦ400, содержание которого принимали из расчета 350, 400, 450, 500 кг цемента на 1 м^3 . Образцы хранили в шурфе, устроенном на строительной площадке, во влажной среде, моделируя температурные и влажностные условия грунтового массива.

С целью ускорения получения результатов получения результатов образцы испытывали в 14-дневном возрасте. На рис. 6 представлена линейная зависимость прочности грунтоцемента от содержания цемента с незначительным возрастанием абсолютных её величин.

Аппроксимация экспериментальных данных выполнена с помощью метода наименьших квадратов. Зависимость прочности от содержания цемента m имеет вид

$$\sigma = 1,036 + 0,00338m. \quad (5)$$

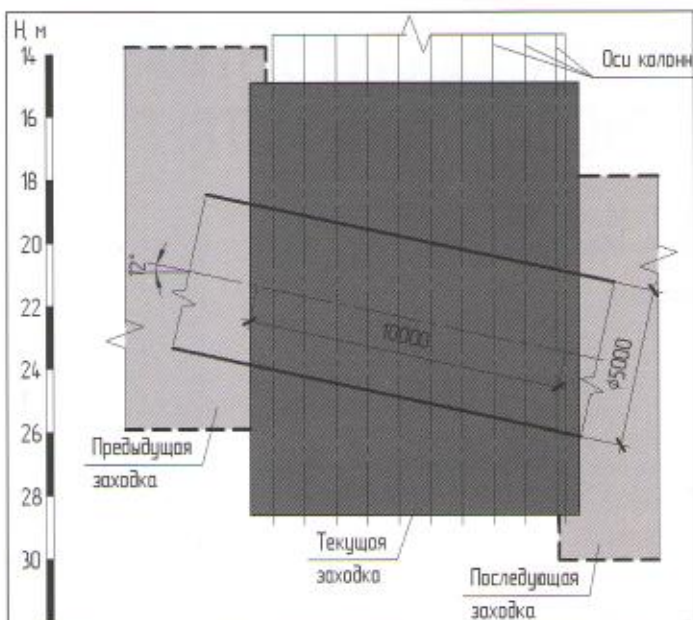


Рис. 3. Продольный разрез участка (заходки) цементации грунтового массива

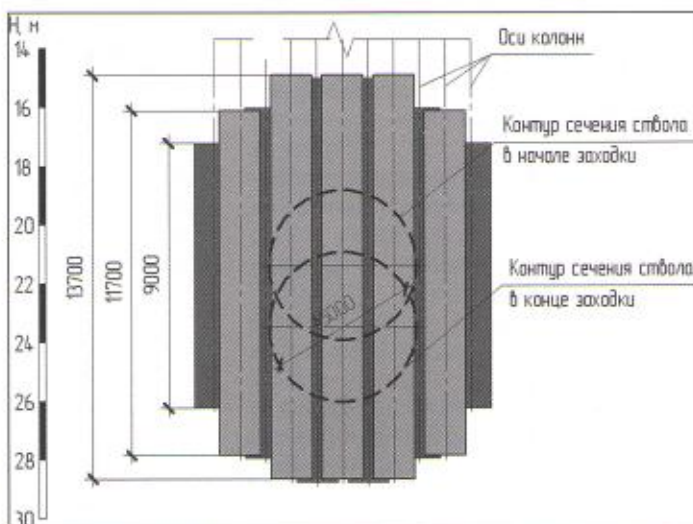


Рис. 4. Поперечный разрез

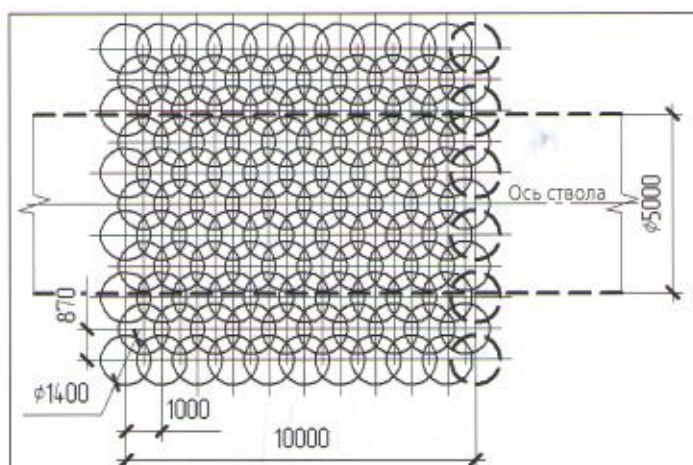


Рис. 5. План расположения колонн

По результатам испытаний был принят расход цемента 600 кг на 1 м^3 скважины. В этом случае при её диаметре 1400 мм объемное содержание цемента составляет приблизительно 400 кг/м^3 , а при диаметре 1500 мм в гравийных отложениях – 340 кг/м^3 .

Рис. 7 иллюстрирует характер набора прочности образцов грунтоцемента при

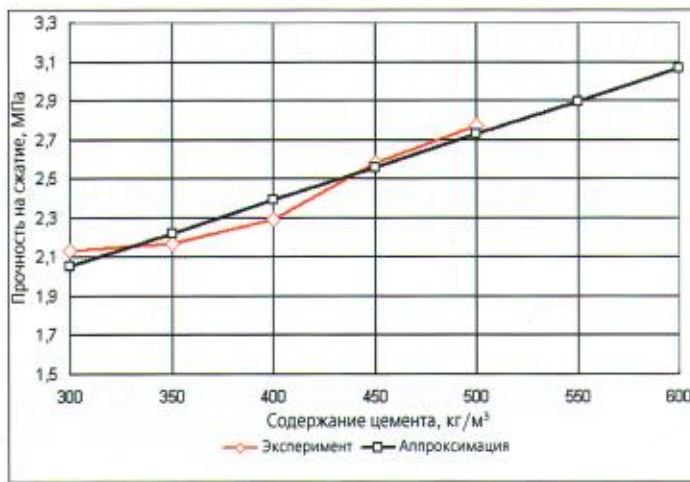


Рис. 6. Зависимость прочности грунтоцемента от содержания цемента

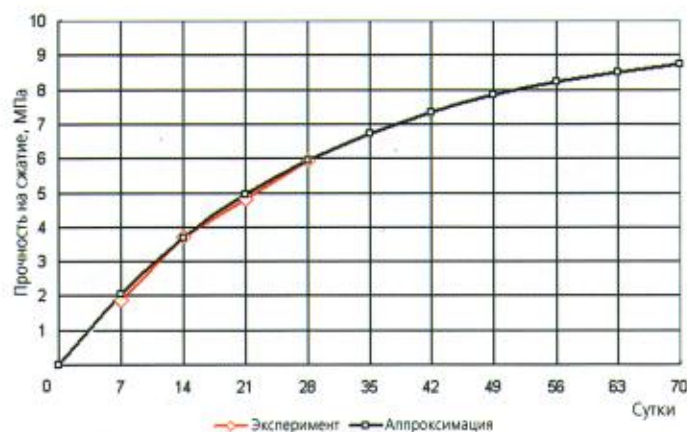


Рис. 7. Зависимость прочности грунтоцемента от возраста образца

расходе цемента 400 кг/м³ укрепленного грунта. Испытания проводили через 7, 14, 28 суток. При созданных температурно-влажностных условиях хранения образцов за стандартный период 28 дней прочность составила приблизительно 6 МПа, однако экстраполяция экспериментальных данных по экспоненциальной зависимости

$$\sigma = 9,6(1 - e^{-0,0346t}) \quad (6)$$

показывает, что прочность образцов через три-четыре месяца достигнет значения 9,6 МПа.

Производство работ

Для производства работ применяли один технологический комплекс в составе буровой установки RAPTOR TWS1400 с высотой мачты 18 м, миксерной станции TWM20 с про-

изводительностью приготовления цементного раствора 20 м³/ч, высоконапорного цементно-растворочного насоса TW351, развивающего давление до 550 атм, силоса для приема цемента объемом 25 м³. Все оборудование произведено фирмой «TECNIWELL» (Италия).

В первоначальный период цемент завозили в мешках МКР. Затем была налажена его поставка железнодорожным путем в г. Воркуту, складирование в силосы и перевозка автоцементовозами на объект.

В связи с климатическими условиями Заполярья, работы были начаты в июне и закончены в сентябре и велись круглосуточно. Средняя ежесуточная производительность составляла 200 п. м бурения лидерных скважин, нагнетание цемента 55 т.

В отдельные дни был достигнут максимальный расход цемента до 120 т в сутки. На наш взгляд, такая производительность является рекордной в нашей стране (на один технологический комплекс).

В целом при устройстве всех заходок было пробурено 19,9 км лидерных скважин, выполнено устройство 1,8 км грунтоцементных колонн, израсходовано 5,6 тыс. т цемента.

Контроль качества работ

Контроль качества состоял из двух этапов: на первом – производили разборку временной крепи забоя ствола, построенного ранее открытым способом, с контрольной разработкой укрепленной породы. Результаты проходки показали, что забой находится в устойчивом состоянии. При этом грунтоцемент имел даже повышенную прочность и с некоторым трудом разрушался отбойными молотками. Это объяснялось увеличенным содержанием цемента при обработке грунта на участке сопряжения с существующим стволом.

На втором этапе выполняли бурение контрольных скважин с отбором керна из заходок № 3, 4, 5. Данные о прочности образцов приведены в табл. 2.

Прочность на растяжение определяли методом раздавливания образцов сферическим индентером в соответствии с ГОСТ 21153.3-85, на сжатие – пересчитывали с применением коэффициента $k = 14,1$, а также по методике СОЮЗДОРНИИ ($k = 10,0$).

Результаты показывают, что по разным оценкам прочность грунтоцемента находилась в диапазоне 8,9–27,8 МПа. Исключением явился один образец с минимальной прочностью 6–8 МПа, который был пробурен из прослая зацементированного суглинка, однако и в этом случае полученное значение превышало проектное (5 МПа).

Таким образом, предложенная технология струйной цементации не только оказалась наиболее экономичной по сравнению со способом замораживания грунтов, но и в сжатый период в условиях короткого заполярного строительного сезона позволила успешно решить поставленную задачу с выполнением всех проектных условий.

Геотехнические параметры грунтобетонного ограждения

Таблица 1

№ заходки	Глубина заложения ствола (по центру)	Тип грунта	Прочность при сжатии, МПа		Толщина ограждения, м			Коэффициент запаса	Максимальная глубина лидерной скважины, м
			нормативная	расчетная	в почве	в кровле	в боковых стенах		
1	10,0-11,7	песок гравелистый	10,0	5,0	2,0	3,0	1,85	2,46	16,2
2	11,7-13,7	песок гравелистый	10,0	5,0	2,0	3,0	1,85	2,24	17,5
3	13,7-15,8	песок гравелистый	10,0	5,0	2,0	3,3	1,85	2,08	19,6
4	15,8-17,9	песок гравелистый, гравий	10,0	5,0	2,0	3,3	1,85	1,95	21,8
5	17,9-20,0	гравий	12,0	6,0	2,1	3,3	1,85	1,85	23,6
6	20,0-22,1	песок гравелистый, гравий	10,0	5,0	2,5	3,3	1,85	1,77	26,4
7	22,1-24,1	песок гравелистый	10,0	5,0	2,5	4,0	1,85	1,71	28,6

Результаты испытания керна грунтоцемента

Таблица 2

№ заходки	Прочность на растяжение, МПа	Прочность на сжатие по ГОСТ 21153.3-85, МПа	Прочность на сжатие по методике СОЮЗДОРНИИ, МПа
3	0,93	13,10	9,32
4	0,90	12,70	8,97
4	1,72	24,30	17,16
5	2,00	27,80	20,00
5	0,61	8,60	6,07