

## ОБОСНОВАНИЕ РАСХОДА ЦЕМЕНТА ПРИ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТА

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

*Технология струйной цементации грунтов находит все более широкое применение при решении различных задач подземного строительства. Сущность технологии описана в различных статьях автора [1-3]. В настоящей статье приводится методика обоснования расхода цемента при устройстве грунтоцементных колонн.*

Наиболее важным параметром, определяющим конечную эффективность струйной технологии, является количество цемента (в сухом состоянии), **содержащегося** в  $1 \text{ м}^3$  укрепленного грунта. Именно данный параметр определяет прочность материала грунтоцементных колонн или их фильтрационные свойства.

К сожалению, в условиях отсутствия общего стандарта под данным параметром часто понимают количество цемента, а иногда даже цементного раствора, **израсходованного** при цементации  $1 \text{ м}^3$  грунта.

Между тем, между этими показателями существует значительное различие. Дело в том, что при устройстве грунтоцементных колонн с помощью струйной цементации происходит достаточно значительный выход грунтоцементной пульпы с высоким содержанием цемента.

Например, в грунтах, не образующих достаточно прочных связей с цементом (суглинки, глины, торф), для получения достаточно высоких прочностных показателей колонн приходится производить продолжительный размыв грунта, сопровождающийся его выносом вместе с пульпой и одновременным замещением цементным раствором. При этом количество цементного раствора, излившегося в виде грунтоцементной пульпы, сопоставимо с количеством цементного раствора, оставшегося в теле колонны. Иногда, как будет показано ниже, потери цемента могут составлять более 50%.

Другой проблемой является знание величины фактического водоцементного отношения раствора, при котором происходит реакция гидратации цемента. В грунтовом массиве инъектируемый цементный раствор смешивается с водой, содержащейся в грунте. При этом происходит разбавление смеси водой и снижение прочностных и других свойств материала грунтоцементных колонн. На рис.1 приведены результаты определения прочности образцов грунтобетона, приготовленного в лабораторных условиях смешением гравийно-галечникового грунта с цементным раствором при различном водоцементном отношении. Из графика следует, что снижение фактического водоцементного отношения по сравнению с проектным значением может привести к значительному снижению прочностных свойств.

В настоящей статье приводится методика, позволяющая рассчитать необходимый расход цемента (или цементного раствора) для устройства колонн с проектным содержанием цемента в  $1 \text{ м}^3$  грунта.

Для расчёта технологических показателей рассмотрим часто применяемый на практике циклический режим устройства грунтоцементной колонны диаметром  $D$  (рис.2), когда в каждом цикле происходит подъём монитора на величину шага  $S$ . Величина шага определяется опытным путём с точки зрения достижения высокой однородности грунта и на практике составляет  $S = 4...10$  см. После обработки грунта в течение интервала времени  $\tau$  происходит дальнейший подъём монитора на шаг  $S$  и т.д.

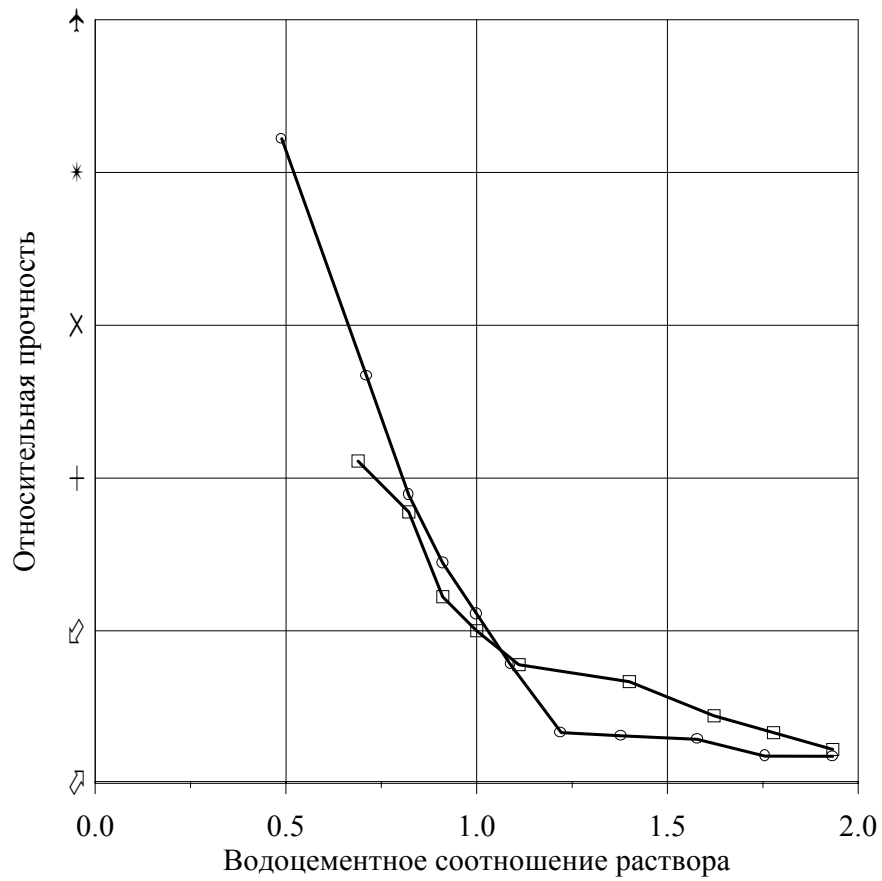


Рис.1. Прочность образцов грунтобетона в зависимости от водоцементного отношения:

$$\square - \sigma_{сж} / \sigma_{сж}^0, \quad \circ - \sigma_p / \sigma_p^0,$$

где  $\sigma_{сж}^0, \sigma_p^0$  – прочность при сжатии и растяжении  
при водоцементном отношении В/Ц = 1,0.

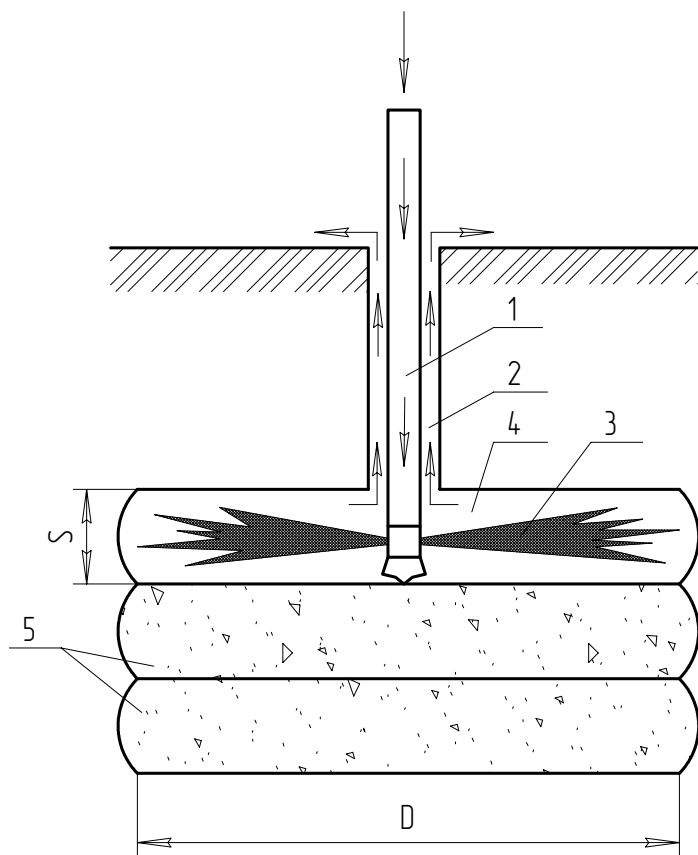


Рис.2. Схема формирования грунтоцементной колонны.

- 1- поступление цементного раствора,
- 2 - выход пульпы (грунтоцементной смеси) через затрубное пространство,
- 3 - водоцементная струя,
- 4 - обрабатываемый объем грунта,
- 5 – грунт, обработанный в течение предыдущих циклов.

Пусть формирование грунтоцементной колонны происходит при истечении из монитора буровой колонны струи цементного раствора с расходом  $q$  (л/мин). Плотность раствора при водоцементном отношении  $wc$  составит

$$\rho_{wc} = (1 + wc) / (1 / \rho_c + wc / \rho_w) \quad (1)$$

где  $\rho_c$ ,  $\rho_w$  – соответственно плотность частиц цемента и воды.

В течение одного цикла обрабатывается объём грунта

$$V_s = \frac{\pi D^2}{4} S \quad (2)$$

Хотя процессы поступления раствора, перемешивания с грунтом и выноса пульпы носят непрерывный характер, для получения расчётных зависимостей дискретизируем процесс, т.е. разобьём период цикла  $\tau$  на временные интервалы  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  и т. д.

$$\tau = \sum_{i=1}^K \Delta t_i \quad (3)$$

В течение первого интервала времени  $\Delta t_1$  в грунт поступит водоцементный раствор объёмом и массой

$$\Delta V_1 = q \cdot \Delta t_1, \quad m_{wc} = \rho_{wc} \cdot \Delta V. \quad (4)$$

Учитывая, что водоцементный раствор массой  $m_{wc}$  содержит массу цемента  $m_c$  и воды  $m_w = wc \cdot m_c$ , можно определить поступление в грунт цемента и воды в массовом выражении

$$m_c = q_c \cdot \Delta t_1, \quad m_w = q_w \cdot \Delta t_1, \quad (5)$$

где расход цемента  $q_c$  и воды  $q_w$  определяется как

$$q_c = \frac{1}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{wc}{\rho_w}} q, \quad q_w = \frac{wc}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{wc}{\rho_w}} q \quad (6)$$

Объём  $V_s$  содержит грунт, пористостью  $p_0$ , с плотностью частиц грунта  $\rho_g$ . Рассматривая вариант цементации обводнённого грунта можно определить массу грунта и воды, содержащиеся в объёме  $V_s$ :

$$m_g = (1 - p_0) \rho_g V_s, \quad m_w = p_0 \rho_w V_s \quad (7)$$

После перемешивания грунта с цементным раствором образуется грунтоцементная смесь объёмом  $V_s + \Delta V$ . Для дальнейших рассуждений примем, что в первом приближении объём излившейся пульпы равен объёму поступившего цементного раствора. Тогда в теле грунтоцементной колонны останется только объёмная доля  $\Delta V_s / (V_s + \Delta V_1)$  образовавшейся грунтоцементной смеси, а оставшаяся часть объёмом  $\Delta V_1$  выйдет в виде пульпы по затрубному пространству на поверхность земли.

В массовом выражении в теле колонны останется грунт, цемент и вода:

$$\begin{aligned} m_c &= q_c \Delta t_1 \theta_1 \\ m_g &= (1 - p_0) \rho_g V_s \theta_1 \\ m_w &= (q_w \Delta t_1 + p_0 \rho_w V_s) \theta_1, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\theta = \frac{V_s}{(V_s + \Delta V_1)}$$

В течение второго интервала времени  $\Delta t_2$  новый цементный раствор объемом  $\Delta V_2 = q \cdot \Delta t_2$  поступит в тело грунтоцементной колонны. После смешения в теле колонны останется грунтоцементная смесь, состоящая из цемента, грунта и воды

$$\begin{aligned} m_c &= (q_c \Delta t_1 \theta_1 + q_c \Delta t_2) \theta_2 \\ m_g &= (1 - p_0) \rho_g V_s \theta_1 \theta_2 \\ m_w &= [(g_w \Delta t_1 + p_0 \rho_w V_s) \theta_1 + q_w \Delta t_2] \theta_2, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\theta_2 = \frac{V_s}{V_s + \Delta V_2}$$

Продолжая данную процедуру, можно рассчитать количество цемента, грунта и воды, содержащихся в теле грунтоцементной колонны, в любой момент времени.

Расчетные зависимости можно упростить, принимая  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3$  и т.д. Тогда имеем  $\tau = \kappa \cdot \Delta t$ .

В этом случае после обработки грунта в течение цикла  $\tau$  количество цемента, грунта и воды в теле сваи можно рассчитать в соответствии с формулами:

$$\begin{aligned} m_c &= q_c \Delta t \sum_{i=1}^{\kappa} \theta^i \\ m_g &= (1 - p_0) \rho_g V_s \theta^{\kappa} \\ m_p &= q_w \Delta t \sum_{i=1}^{\kappa} \theta^i + p_0 \rho_w V_s \theta^{\kappa} \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\theta = \frac{V_s}{V_s + \Delta V}, \quad \kappa = \frac{\tau}{\Delta t}.$$

Переход от дискретной схемы к непрерывному процессу можно выполнить, уменьшая величину временного шага  $\Delta t$ . Численный эксперимент показал, что решение сходится к некоторой асимптотической величине при количестве интервалов  $\kappa > 100$ .

С помощью полученных зависимостей (10) можно легко рассчитать основные технологические характеристики, такие как, плотность материала тела грунтоцементных колонн, количество цемента, содержащегося в единице объема грунтоцементных колонн, фактическое водоцементное отношение грунтоцементной смеси, а также потери цемента, связанные с выходом пульпы.

Для анализа зависимостей (10) рассмотрим пример укрепления обводненного грунта. Пористость грунта составляет – 25%, плотность частиц грунта – 2.4 г/см<sup>3</sup>. Расход цементного раствора составляет 90 л/мин, водоцементное отношение – В/Ц = 1.0. Плотность частиц цемента – 2.7 г/см<sup>3</sup>. В течение каждого цикла монитор поднимают на высоту 4.0 см. Диаметр грунтоцементной колонны – 600 мм.

На рис.3 показано возрастание содержания цемента в теле колонны (расчет ведется применительно к элементарному цилиндру диаметром 0.6 м и высотой 4 см) в зависимости от продолжительности цикла обработки грунта. Из рисунка следует, что при продолжительности цикла более 12 секунд потери цемента будут превышать количество цемента, «оставленного» в теле колонны.

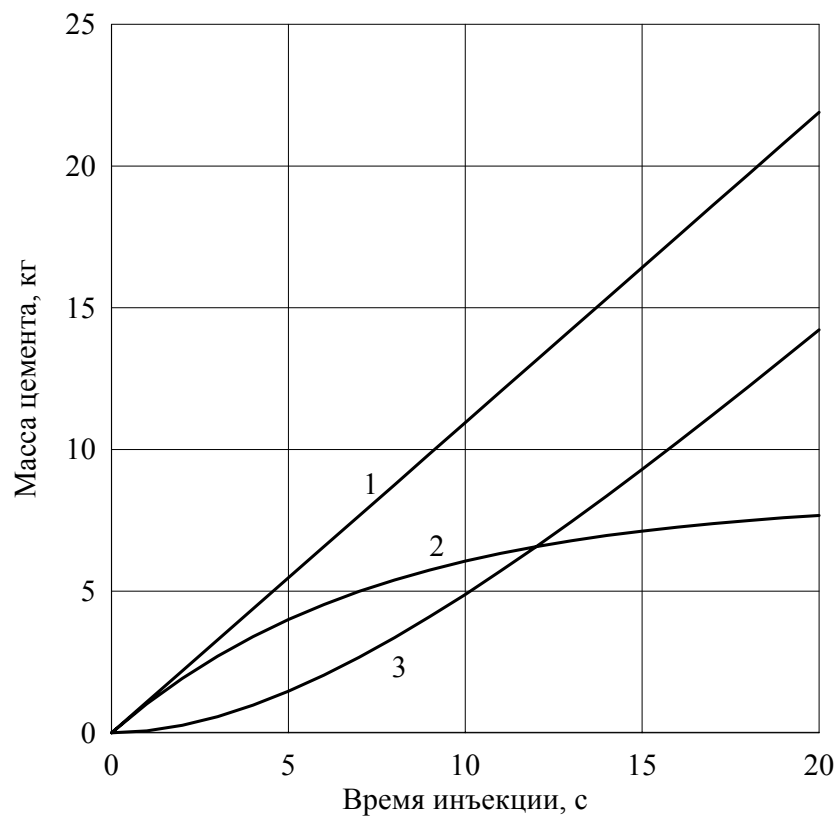


Рис.3. Содержание цемента в объеме грунтоцементной колонны в зависимости от продолжительности цикла обработки грунта.

- 1 – расход цемента в составе струи цементного раствора,
- 2 – фактическое содержание цемента в теле колонны,
- 3 – потери цемента в виде пульпы.

На рис.4 показаны изменения физико-механических свойств материала грунтоцементной колонны (содержание цемента, водоцементное отношение и отношение массы цемента к массе грунта) в зависимости от времени цементации грунта при различном водоцементном отношении инъектируемого раствора. Для более наглядного восприятия все характеристики определяли применительно к времени устройства 1 п.м. колонны (25 шагов по 4 см).

Определенный интерес представляет второй график, который наглядно иллюстрирует резкое разбавление раствора водой, содержащейся в порах грунта до отношения В/Ц=4-5. Для того, чтобы добиться приемлемых значений водоцементного отношения, обеспечивающих высокие прочностные свойства, требуется достаточно продолжительный (более 200 секунд) период обработки грунта.

В заключение отметим, что зависимости (10) могут легко быть обобщены на случаи пористого влажного и абсолютно сухого грунта.

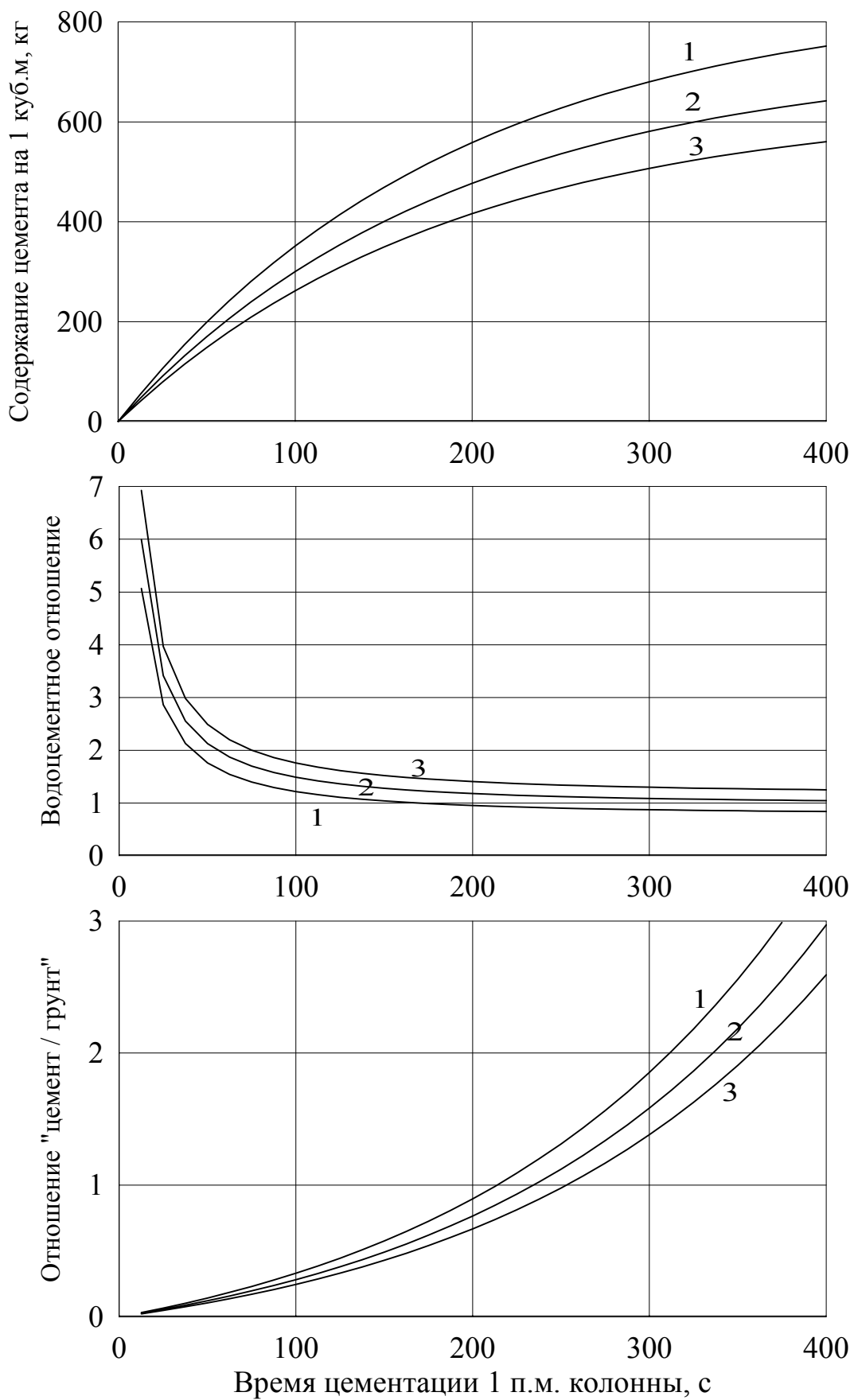


Рис.4. Характеристики грунтоцементной колонны в зависимости от времени цементации 1 п.м. колонны:  
 1 – раствор с отношением В/Ц=0.8, 2 - В/Ц=1.0, 3 - В/Ц=1.2.

**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. Малинин А.Г., Малинин П.А. Повышение несущей способности грунтоцементных свай с помощью гидроразрыва. 2001, №5-6.

Контактные телефоны: (3422) 196-103, 196-361

Официальный сайт в Интернете: [www.jet-grouting.ru](http://www.jet-grouting.ru)