

УДК 624.15.001

Бойко И.Л., к.т.н., Раед М. Абдулхуссейн, инж.

Республиканский институт инновационных технологий РИИТ БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь

Легенченко В.А., асп., Аль-Маданат-Васим-Зайед, Шаповал В.Г., д.т.н., проф.,
Государственное ВУЗ "Национальный горный университет", г. Днепрпетровск, Украина

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСИЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЖЕТ-ТЕХНОЛОГИИ ОСНОВАНИЙ

Джет-технология получила широкое применение в мировой практике строительства и в частности, в республике Беларусь [1, 2].

При этом имеет проблема использования данного метода при реконструкции зданий и сооружений, поскольку в процессе строительства происходит разрушение и обводнение основания, а набор грунтоцементом проектной прочности занимает от 21 до 40 суток (в зависимости от температуры основания).

В настоящей статье изложена методика, позволяющая решить очерченные выше проблемы.

Суть методики заключается в следующем:

1. Основания реконструируемых зданий и сооружений, которые усиливаются с использованием методом струйной цементации, на этапе их изготовления и набора грунтоцементом проектной прочности следует рассчитывать по первой и второй группам предельных состояний, т.е. по прочности, устойчивости, несущей способности и деформациям.

1.1. Основание по несущей способности и прочности следует рассчитывать в том случае, когда цементация выполняется в непосредственной близости от существующих фундаментов или в том случае, когда приложение к нему нагрузки осуществляется до полного рассеивания порового давления в нагнетаемой в грунт жидкости.

1.2. Проверку прочности грунтоцементных элементов следует выполнять в том случае, когда к нагрузке у основанию прикладывается до набора ими проектной прочности.

1.3. Расчет оснований по деформациям следует выполнять во всех случаях.

2. В результате расчета оснований по первой группе предельных состояний необходимо добиться выполнения условий:

$$F \leq \gamma_c \cdot F_u / \gamma_n, \quad (1)$$

где F – расчетная нагрузка на основание; F_u – сила предельного сопротивления основания; γ_c – коэффициент условий работы; γ_n – коэффициент надежности по

назначению сооружения, принимаемый равным 1,2; 1,15 и 1,10 соответственно для зданий и сооружений I, II и III классов.

Входящие в формулу (1) параметры следует принимать в соответствии с рекомендациями [3].

При этом вместо фактического значения угла внутреннего трения φ_1 следует принимать его фиктивное значение φ_1^* , которое необходимо определять по формуле:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1^* &= \arcsin \left[\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_{3-2 \cdot P + 2 \cdot c} \cdot \operatorname{ctg}(\varphi_1)} \right]; \\ \sigma_1 &\leq \sigma_2 \leq \sigma_3, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где: φ_1 – фактическое значение угла внутреннего трения, определенное на интервале доверительной вероятности $\alpha = 0,95$; φ_1^* фактическое значение угла внутреннего трения, определенное на по формуле (2); σ_1, σ_2 и σ_3 – главные напряжения в рассматриваемой точке основания, которые следует определять в соответствии с требованиями пункта 2.1 настоящей методики; P – поровое давление в рассматриваемой точке, которое следует определять в соответствии с требованиями пункта 2.2 настоящей методики.

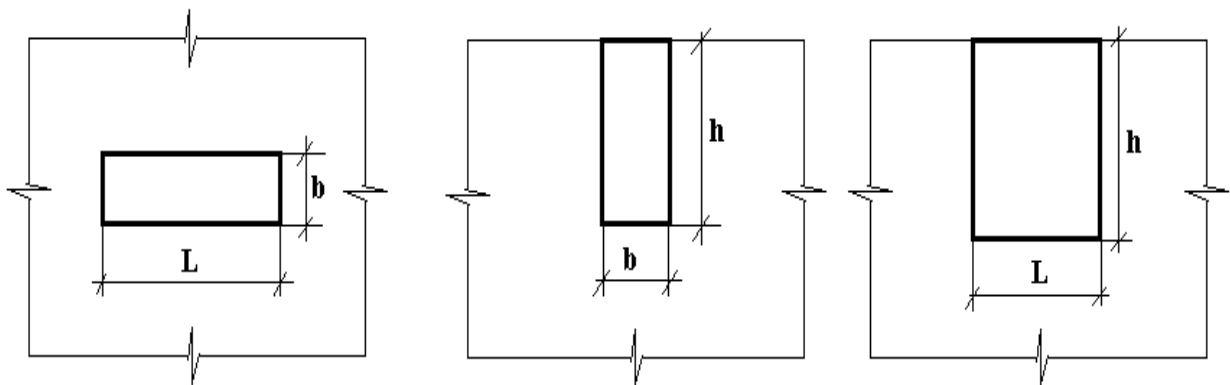


Рис. 1. Фактическая расчетная схема основания

Примечание: b и L – размеры загруженной области в плане; h – расстояние от дневной поверхности до низа грунтоцементных элементов

2.1. Главные напряжения в основании следует определять с использованием техники метода конечной элементов.

Грунт следует моделировать с использованием 4 – узловых (тетраэдров), 6 – узловых (гексаэдров) и 8 – узловых (октаэдров) элементов.

Грунтоцементные элементы следует моделировать с использованием линейных (2 – узловых) элемента.

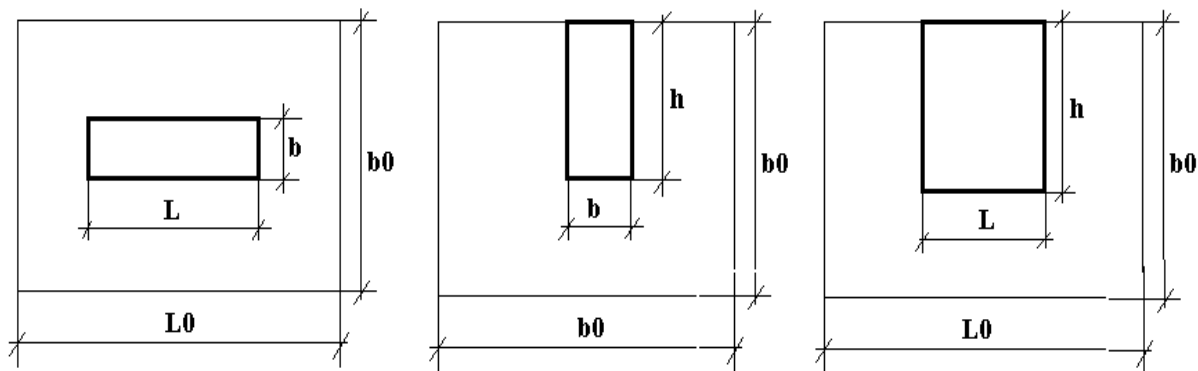


Рис. 2. Приближенная расчетная схема основания

Примечания:

1. b и L – размеры загруженной области в плане; а h – расстояние от дневной поверхности до низа грунтоцементных элементов
2. b_0 , L_0 и h_0 – размеры расчетной области.

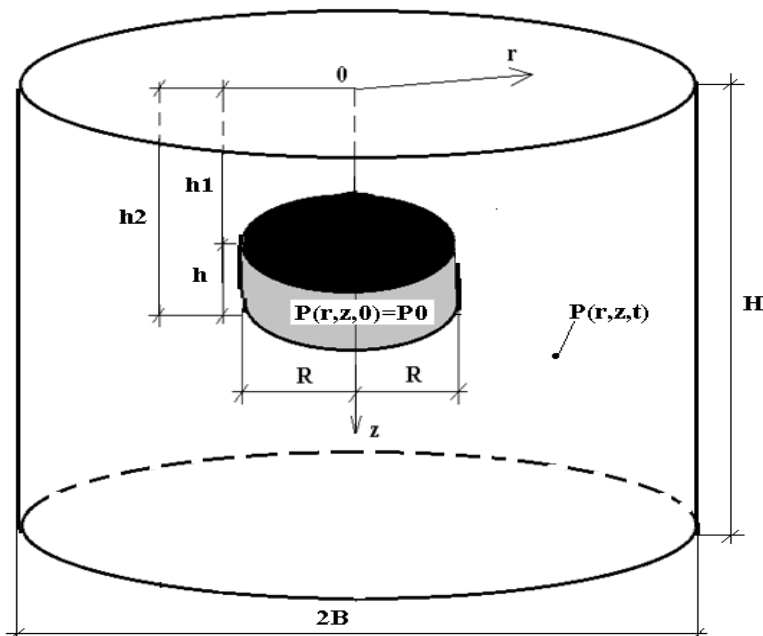


Рис. 3. К определению порового давления в грунтовом основании при устройстве грунтоцементного элемента

Размеры расчетной области следует принимать в соответствии с расчетными схемами, представленными на рисунках 1 и 2 [4].

Размеры расчетной области следует определять по формулам:

$$b_0 = K_b \cdot b; L_0 = K_L \cdot b; h_0 = K_h \cdot b; \} \quad (3)$$

где K_b , K_L и K_h – коэффициенты, которые следует принимать по таблице 4.1.1, а b – ширина загруженной области.

Деформационные свойства грунта следует принимать в соответствии с данными инженерно – геологических изысканий, а деформационные свойства грунтоцемента – в соответствии с формулами (8).

2.2. Поровое давление в процессе инъецирования следует определять с использованием представленной на рисунке 3 расчетной схемы и формулы (4):

$$\left. \begin{aligned} P &= k_1 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} A_{i,j,k} \cdot f_{1,i,j,k}(r,z) \cdot f_{2,i,j,k}(t); \quad k_1 = \frac{2 \cdot P_0 \cdot R}{\pi \cdot b_{\infty}}; \\ A_{i,j,k} &= \frac{J_1\left(\frac{\mu_j}{b} \cdot R\right)}{i \cdot \mu_j \cdot J_1^2(\mu_j)} \cdot \left[\cos\left[\frac{i \cdot \pi \cdot h_2}{H}\right] - \cos\left[\frac{i \cdot \pi \cdot h_1}{H}\right] \right]; \\ f_{1,i,j,k}(r,z) &= J_0\left(\frac{\mu_j}{b} \cdot r\right) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot z}{H}\right); \quad \theta = \frac{\left\langle i^2 \cdot \pi^2 \cdot b^2 + \mu_j^2 \cdot H^2 \right\rangle}{H^2 \cdot b^2}; \\ f_{2,i,j,k}(t) &= \exp(-\theta \cdot c_v \cdot t). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где: E – модуль общей деформации грунта; ν – коэффициент Пуассона грунта; k_f – коэффициент фильтрации грунта; $c_v = \frac{(3 \cdot \lambda + 2G) \cdot k_f}{3 \cdot \gamma_w}$ – коэффициент пространственной консолидации (если он известен то представленные в пунктах 1–3 характеристики грунта можно опустить); $\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 - 2 \cdot \nu) \cdot (1 + \nu)}$ и $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$ – упругие константы Ламе; γ_w – удельный вес воды; R – радиус области, в которой выполняется цементация (т.е. грунтоцементного элемента); h_2 – глубина, с которой начинается струйная цементация; h_1 – глубина, на которой завершается струйная цементация; $b_{\infty} = 20 \cdot R$ – размер расчетной плоскости в радиальном направлении; $H_{\infty} = 10 \cdot (h_2 - h_1)$ – размер расчетной плоскости по вертикали; P_0 – давление инъецирования; V – скорость вертикального подъема штанги; Δt – интервал времени, на которые разбито время подъема штанги.

2.3. Допускается принимать поровое давление в пределах всей длины образованной в процессе усиления основания методом струйной цементации полости равным P_0 , а напряженно – деформированное состояние основания рассчитывать с использованием метода конечных элементов (не выгоднейший случай).

2.4. Время рассеивания давления в поровой жидкости в основании и начальное поровое давление следует определять по формулам:

$$\left. \begin{aligned} t_{st} &\geq \frac{R^2}{2,5 \cdot c_v}; \quad P_0 = \frac{g \cdot P_p \cdot T}{R^2 \cdot H} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где t_{st} – время уменьшения порового давления в основании в 10 раз; R и H – соответственно радиус и высота грунтоцементного элемента; g – расход

нагнетаемой водно – цементной смеси; P_p – давление в нагнетаемой водно – цементной смеси; T – время устройства грунтоцемента; c_v - коэффициент пространственной консолидации основания.

$$t_{st} \geq \frac{R^2}{2,5 \cdot c_v} \quad (5)$$

3. В результате расчета грунтоцементных элементов необходимо добиться выполнения условия:

$$\left. \begin{aligned} K = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 - 2 \cdot P_{zu}(t) \cdot + 2 \cdot c_{zu}(t) \cdot ctg(\varphi_{zu}(t))} \leq 1 \\ \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где: $\varphi_{zu}(t)$ – угол внутреннего трения грунтоцемента, который следует определять по формуле (8); $c_{zu}(t)$ - удельное сцепление грунтоцемента, которое следует определять по формуле (8); σ_1, σ_2 и σ_3 - главные напряжения в рассматриваемой точке основания, которые следует определять в соответствии с требованиями пункта 2.1 настоящей методики; P_{zu} – поровое давление в рассматриваемой точке грунтоцемента, которое следует определять в соответствии с требованиями пункта 3.3 настоящей методики.

В формуле (6) допускается принимать:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 = \frac{N}{A}; \quad \sigma_2 = \sigma_3; \quad K = \frac{\frac{N}{A}}{\frac{N}{A} - 2 \cdot P_{zu}(t) \cdot + 2 \cdot c_{zu}(t) \cdot ctg(\varphi_{zu}(t))} \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где: N – максимальная осевая сила в грунтоцементе (определяется в процессе конечно – элементного расчета); A – площадь поперечного сечения грунтоцементного элемента; $P_{zu}(t)$ – поровое давление в грунтоцементном элементе; $\varphi_{zu}(t)$ и $c_{zu}(t)$ – см. пояснения к формуле (6).

3.1. Угол внутреннего трения и удельное сцепление грунтоцемента в расчетный момент времени t следует определять по формуле:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{zu}(t) = \arcsin \left[\frac{R_b(t) - R_{bt}(t)}{R_b(t) + R_{bt}(t)} \right]; \quad c_{zu}(t) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{R_b(t) \cdot R_{bt}(t)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где: $R_b(t)$ – прочность грунтоцемента на сжатие в расчетный момент времени t ; $R_{bt}(t)$ – прочность грунтоцемента на растяжение в расчетный момент времени t .

3.2. Прочность грунтоцемента на сжатие $R_b(t)$ и растяжение $R_{bt}(t)$, а также его модуль общей деформации $E(t)$ в расчетный момент времени t следует определять по формулам:

$$\left. \begin{aligned} R_b(t) &= R_b(28) \cdot (-0,001 \cdot t^2 + 0,0562 \cdot t + 0,1991); \\ R_{bt}(t) &= R_{bt}(28) \cdot (-0,001 \cdot t^2 + 0,0562 \cdot t + 0,1991); \\ E(t) &= E(28) \cdot (0,2448 \cdot \ln(t) + 0,2275); t \in (1, \dots, 28) \text{ суток.} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Здесь $R_b(28)$, $R_{bt}(28)$ и $E(28)$ – соответственно прочность грунтоцемента на сжатие и растяжение, а также модуль общей деформации грунтоцемента в возрасте 28 суток; t – время в сутках;

3.3. Поровое давление внутри грунтоцементного элемента в расчетный момент времени следует определять с использованием схемы на рисунке 4. При этом для его определения и определения времени уменьшения порового давления в 10 раз следует использовать формулы вида:

$$P_{zu}(t) = \frac{N}{A} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\pi^2}{H^2} + \frac{\mu^2}{R^2} \right) \cdot \int_0^t c_v(\tau) \cdot d\tau \right]; \int_0^{t_{st}} c_v(\tau) \cdot d\tau \geq \frac{H^2 \cdot R^2}{4,3 \cdot R^2 + 2,5 \cdot H^2} \quad (10)$$

где: N – максимальная осевая сила в грунтоцементе (определяется в процессе конечно – элементного расчета); $c_v(t)$ – коэффициент пространственной консолидации основания, который следует определять по формулам (11). A – площадь поперечного сечения грунтоцементного элемента; $\mu = 2,4048$ – первый нуль уравнения $J_0(x) = 0$, где $J_0(x)$ – функция Бесселя первого рода с нулевым индексом.

3.4. Коэффициент пространственной грунтоцемента консолидации следует определять по формулам:

$$\left. \begin{aligned} c_v(t) &= \frac{[3 \cdot \lambda_{zu}(t) + 2 \cdot G_{zu}(t)] \cdot k_{f, zu}(t)}{3 \cdot \gamma_w}; \lambda_{zu}(t) = \frac{\nu \cdot E_{zu}(t)}{(1 - 2 \cdot \nu_{zu}) \cdot (1 + \nu_{zu})}; \\ G_{zu}(t) &= \frac{E_{zu}(t)}{2 \cdot (1 + \nu_{zu})}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

3.5. Коэффициент фильтрации грунтоцемента в заданный момент времени t следует рассчитывать по формуле:

$$k_{f, zu}(t) = k_f + \frac{k_b - k_f}{28} \cdot t; k_b = 1,72 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}}{\text{сутки}}; \text{при } t \in (0, 28). \quad (12)$$

Здесь: $k_{f, zu}(t)$ – коэффициент фильтрации грунтоцемента в расчетный момент времени t (имеет размерность м/сутки); k_f – коэффициент фильтрации грунта в исходном состоянии (имеет размерность м/сутки); k_b – коэффициент фильтрации бетона класса W–4 в возрасте 28 суток.

4. В результате расчета по второй группе предельных состояний необходимо добиться выполнения условий:

$$S \leq S_u, \quad (13)$$

Здесь: S - расчетная осадка; S_u - предельное значение совместной деформации основания и сооружения для данного класса сооружений.

4.1. Деформации основания следует определять с использованием техники метода конечной элементов.

Грунт следует моделировать с использованием 4 – узловых (тетраэдров), 6 – узловых (гексаэдров) и 8 – узловых (октаэдров) элементов.

Грунтоцементные элементы следует моделировать с использованием линейных (2 – узловых) элемента.

Размеры расчетной области следует принимать в соответствии с расчетными схемами, представленными на рисунках 1 и 2 (эти данные получены в работе [4]):

Деформационные свойства грунта следует принимать в соответствии с данными инженерно – геологических изысканий, а деформационные свойства грунтоцемента – в соответствии с формулами (9).

4.2. Расчет деформаций усиленных с использованием струйной цементации оснований следует выполнять с использованием совместной схемы расчета.

4.3. Допускается выполнять расчет с использованием отдельной схемы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ТКП 45-5.01-45-2006 (02250). Фундаменты и подземные сооружения, возводимые с использованием струйной технологии. Правила проектирования у устройства. – Минстройархитектуры РБ. – Минск, 2006. – 33 с.

2. Власов С.Ф. Теоретические и прикладные основы струйного закрепления слабых дисперсных пород при ведении горных работ. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Днепропетровск, 1999. - 359 с.

3. ДБН В2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування.

4. Шаповал. А.В. К вопросу определения размеров породного массива при совместной схеме расчета конструкций на грунтовом основании. Форум гірників. Матеріали міжнародної конференції. Дніпропетровськ, 2015 – С. 164 – 167