

UDC 624.1

<http://doi.org/10.5281/zenodo.2539758>

## НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

©Джалилов Т. Ф., канд. техн. наук, Таджикский технический университет  
им. акад. М.С. Осими, г. Душанбе, Таджикистан, [ttu@ttu.tj](mailto:ttu@ttu.tj)

## MONITORING OF DEFORMATIONS OF ENGINEERING STRUCTURES IN DIFFICULT ENGINEERING-GEOLOGICAL CONDITIONS

©Jalilov T., Ph.D., Tajik Technical University named after M.S. Osimi,  
Dushanbe, Tajikistan, [ttu@ttu.tj](mailto:ttu@ttu.tj)

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы, связанные с механико–математическим обоснованием геодезических измерений, подобрана математическая модель хода осадок наблюдаемых сооружений, получены зависимости между периодам наблюдений и скоростью осадок.

*Abstract.* The issues associated with mechanical–mathematical substantiation of the geodetic measurements matched the mathematical model of the progress observed sediment structures, dependences between the periods of observation and speed of the sediment.

*Ключевые слова:* геодезия, деформаций инженерных сооружений, физико-механические свойства грунтов.

*Keywords:* geodesy, deformations of engineering structures, physical and mechanical properties of soils.

При изучении деформаций инженерных сооружений геодезическими методами в районах со сложными инженерно-геологическими условиями необходимо определять точность и периодичность измерений, что влияет на выбор приборов и методику геодезических наблюдений.

При геодезических наблюдениях деформаций инженерных сооружений не всегда учитываются физико-механические свойства грунтов. Осадки зданий и сооружений возникают вследствие деформаций грунтов оснований, на которых они возводятся, поэтому свойства, присущие, в совокупности с особенностями прилагаемых нагрузок определяют характер происходящих вертикальных смещений.

Одна из отличительных особенностей просадочных грунтов при сейсмических воздействиях является их способностью, в определенных условиях, к дополнительному уплотнению, т.е к просадкам.

Вопросы расчета осадок инженерных сооружений рассматриваются в механике грунтов. Для определения конечных осадок оснований инженерных сооружений и исследования их хода во времени используют различные физико-математические модели. Проверка этих моделей и соответствующая их корректировка основана на результатах натуральных геодезических наблюдений за осадками сооружений, построенных и эксплуатируемых в различных инженерно-геологических условиях [1].

Необходимость постановки таких наблюдений предопределяет связь механики грунтов с инженерной геодезией и позволяет найти механико-математическое обоснование геодезических измерений и выявить ход осадок сооружений во времени. При выполнении этих измерений основное внимание сосредотачивается на определении скорости осадки  $v$ . Практически вычисляется скорость движения осадочных марок, закрепленных в основании инженерных сооружений [2]. Известно, что скорость равна производной пройденного пути  $S$  за время  $t$ , т.е.:

$$v = \frac{dS}{dt}. \quad (1)$$

В данном случае пройденный путь  $S$  является осадкой за время  $t$ . Осадка относится к неравномерному движению и для некоторого периода времени  $\Delta t$  она приобретает величину  $\Delta S$ .

Переходя в (формуле 1) к конечным приращениям, находят среднюю скорость осадки за время  $\Delta t$  и получают

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t}. \quad (2)$$

Измеренные величин  $\Delta S$  и  $\Delta t$  определяются с помощью стандарта  $\sigma(\Delta S)$  и  $\sigma(\Delta t)$ . Для определения стандарта скорости осадки  $\sigma(v)$  прологарифмируем значение скорости

$$\ln v = \ln \Delta S - \ln \Delta t. \quad (3)$$

Тогда

$$\frac{dv}{v} = \frac{d(\Delta S)}{\Delta S} - \frac{d(\Delta t)}{\Delta t}. \quad (4)$$

Отсюда дисперсия скорости осадки будет

$$\sigma^2(v) = v^2 \left[ \frac{\sigma^2(\Delta S)}{\Delta S^2} + \frac{\sigma^2(\Delta t)}{\Delta t^2} \right], \quad (5)$$

а стандарт скорости осадки составит:

$$\sigma(v) = \frac{v}{\Delta t} \sqrt{\sigma^2(\Delta S) + v^2 \sigma^2(\Delta t)}. \quad (6)$$

Относительная погрешность определения скорости осадки находится по формуле

$$\frac{\sigma(v)}{v} = \sqrt{\frac{\sigma^2(\Delta S)}{\Delta S^2} + \frac{\sigma^2(\Delta t)}{\Delta t^2}}. \quad (7)$$

При организации, производстве и обработке наблюдений за осадками сооружений возникает необходимость решения прямой, а чаще, и обратной задач теории погрешностей измерений. Прямая задача заключается в определении  $\sigma(v)$  или  $\frac{\sigma(v)}{v}$  по заданным параметрам, входящим в формулы (6) или (7). Обратная задача сводится к отысканию необходимой точности измерений осадки, определению периода наблюдений и оценки его точности по заданным значениям  $\sigma(v)$  или  $\frac{\sigma(v)}{v}$ . Решение прямой задачи, осуществляемое в процессе наблюдений за осадками и после их завершения, является сравнительно простым. Все параметры, от которых зависят значения  $\sigma(v)$  или  $\frac{\sigma(v)}{v}$ , оказываются известными. Более сложным является решение обратной задачи в процессе проектирования наблюдений за осадками, когда число уравнений, связывающих искомые величины с заданными, становится

недостаточным для однозначного определения  $\sigma(\Delta S)$ ,  $\Delta t$  и  $\sigma(\Delta t)$ . Для решения такой задачи требуется гипотетическое построение модели осадки и примерное нахождение параметров.

Если задаться некоторыми значениями  $\sigma(\Delta S)$  и  $\sigma(\Delta t)$ , то относительная погрешность определения скорости осадки будет зависеть от самой этой скорости или параметров, по которым она находится. Очевидно, с увеличением скорости осадки происходит уменьшение относительной погрешности  $\frac{\sigma(v)}{v}$ . Обычно после возведения инженерного сооружения в начальной стадии скорость осадки довольно большая, а через некоторый промежуток времени она постепенно уменьшается и становится практически неощутимой. Устойчивость сооружения определяется не столько первым периодом эксплуатации, когда под воздействием нагрузки происходит неизбежный процесс сжатия основания, сколько последующими периодами, когда сравнительно небольшие изменения скоростей осадок в разных местах основания могут привести к неравномерной осадке фундамента и разрушению сооружения [3-5]. Поэтому оказывается важной не столь высокая точность определения скорости осадки в первый период, сколько в последующие периоды эксплуатации сооружения. Если задаться некоторым значением относительной погрешности  $\frac{\sigma(v)}{v} \leq \frac{1}{N}$ , то стандарты  $\sigma(\Delta S)$  и  $\sigma(\Delta t)$  должны удовлетворять условию

$$\frac{\sigma^2(\Delta S)}{\Delta S^2} + \frac{\sigma^2(\Delta t)}{\Delta t^2} \leq \frac{1}{N}. \quad (8)$$

Для предварительного расчета воспользуемся принципом равного влияния источников погрешностей и примем, что

$$\frac{\sigma(\Delta S)}{\Delta S} = \frac{\sigma(\Delta t)}{\Delta t}. \quad (9)$$

Тогда

$$\frac{\sigma(\Delta t)}{\Delta t} \leq \frac{1}{N\sqrt{2}}. \quad (10)$$

Задавшись некоторым приемлемым для конкретных условий наблюдений стандартом  $\sigma(\Delta t)$ , получим

$$\Delta t \geq N\sqrt{2} \sigma(\Delta t). \quad (11)$$

Если имеется приближенное представление о ходе осадки во времени, то лучше найти период времени  $\Delta t$ , в течение которого осадка изменяется более или менее равномерно. Тогда необходимая точность определения такого периода составит

$$\sigma(\Delta t) \leq \frac{\Delta t}{N\sqrt{2}}. \quad (12)$$

Используя формулы (8) и (9), получим

$$\frac{\sigma(\Delta S)}{\Delta S} \leq \frac{1}{N\sqrt{2}}. \quad (13)$$

Однако  $\Delta S = v \cdot \Delta t$  следовательно,

$$\sigma(\Delta S) \leq \frac{v\Delta t}{N\sqrt{2}}. \quad (14)$$

При этом представление о скорости осадки становится крайне необходимым. Ранее было отмечено, что скорость осадки не остается постоянной и процессе эксплуатации сооружения она уменьшается.

Если период времени ( $\Delta t$ ) сохраняется неизменным, то возникает необходимость постепенного повышения точности измерения осадки. Однако период равномерной осадки с уменьшением скорости возрастает. Поэтому стандарт  $\sigma$  ( $\Delta S$ ) может быть найден для некоторой заданной ступени осадки  $\Delta S$ . Например, для  $N=10$ ,  $\Delta S = 0,2$  см и  $\sigma(t) = 0,1$  месяца, получим  $\Delta t \geq 14,14 \cdot 0,1 \approx 1,4$  мес.,  $\sigma(\Delta S) \leq \frac{0,2}{14,14} \approx 0,2 \cdot 0,071 \approx 0,01$  см. В этом случае предполагается, что скорость осадки  $v = \frac{\Delta S}{\Delta t} \leq \frac{0,2}{1,4} \approx 0,2 \cdot 0,71 \approx 0,14$  см/мес.

Результаты наблюдений за осадкой сооружения по каждой фиксированной в натуре точке, показывают на графике в системе прямо-угольных координат (ось абсцисс — время  $t$ , ось ординат — осадка  $S$ ). Такой график изменения осадки во времени аппроксимируют кривой, уравнение которой известно (Рисунок 1).

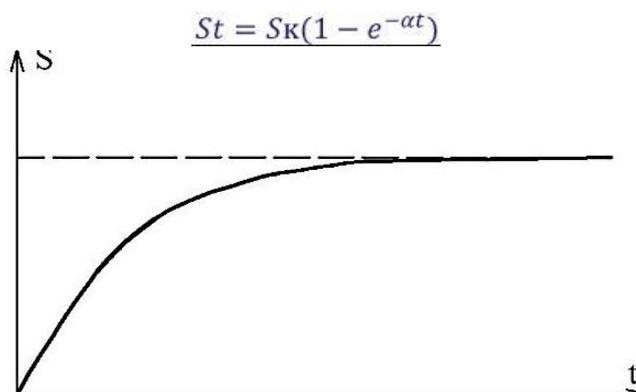


Рисунок 1. График изменения осадки во времени

Чаще всего прибегают к экспоненциальной кривой, характеризуемой уравнением:

$$S_t = S_K(1 - e^{-at}). \tag{15}$$

Здесь  $S_K$  — практически конечная осадка и  $a$  — эмпирический коэффициент, зависящий от характеристики грунта, конструкции

фундамента, нагрузки и других условий. Для последующего расчета, связанного с применением этой формулы, в Таблице 1 приведены значения  $e^{-x}$  для некоторых  $x = at$ . Из Таблицы 1 видно, что практически окончательная осадка наступает в случае  $x = at \approx 10$ .

Таблица 1

ЗНАЧЕНИЯ  $exp(-x)$

| $x$  | $e^{-x}$ | $x$  | $e^{-x}$ | $x$  | $e^{-x}$ | $x$ | $e^{-x}$ | $x$  | $e^{-x}$ |
|------|----------|------|----------|------|----------|-----|----------|------|----------|
| 0,00 | 1,000    | 0,45 | 0,638    | 0,90 | 0,407    | 1,7 | 0,183    | 3,5  | 0,030    |
| 0,05 | 0,951    | 0,50 | 0,603    | 0,95 | 0,387    | 1,8 | 0,165    | 4,0  | 0,018    |
| 0,10 | 0,905    | 0,55 | 0,577    | 1,0  | 0,368    | 1,9 | 0,150    | 4,5  | 0,011    |
| 0,15 | 0,861    | 0,60 | 0,549    | 1,1  | 0,333    | 2,0 | 0,135    | 5,0  | 0,007    |
| 0,20 | 0,819    | 0,65 | 0,522    | 1,2  | 0,301    | 2,2 | 0,111    | 5,5  | 0,004    |
| 0,25 | 0,779    | 0,70 | 0,497    | 1,3  | 0,272.5  | 2,4 | 0,091    | 6,0  | 0,0025   |
| 0,30 | 0,741    | 0,75 | 0,472    | 1,4  | 0,247    | 2,6 | 0,074    | 7,0  | 0,0009   |
| 0,35 | 0,705    | 0,80 | 0,449    | 1,5  | 0,223    | 2,8 | 0,061    | 8,0  | 0,0003   |
| 0,40 | 0,670    | 0,85 | 0,427    | 1,6  | 0,202    | 3,0 | 0,050    | 10,0 | 0,0001   |

Такое уравнение используется для отыскания коэффициента  $a$  при известном значении  $t$ , соответствующем стабилизации осадки, очевидно,  $a \approx \frac{10}{t}$ . Например, для  $t = 24$  мес. получим  $a \approx 0,42$ . Практически для разных сооружений и различных условий коэффициент  $a$  колеблется в широком диапазоне ( $0,05 < a < 2,5$ ).

Планируя наблюдения за осадкой сооружения, нужно по аналогии с эксплуатируемыми сооружениями принять некоторые значения параметров, определяющие  $S_b$ , а в процессе наблюдений уточнять такую гипотезу — модель осадки. Для этой модели скорость осадки определяют по формуле (1). Очевидно,

$$v = \frac{dS}{dt} = S_{\kappa} e^{-at} . \quad (16)$$

Скорость осадки изменяется во времени. График такого изменения показан на рис. 2. Для некоторого промежутка времени — от  $t_1$  до  $t_2$  осадка приобретает значение:

$$\begin{aligned} \Delta S &= \int_{t_1}^{t_2} v dt = \int_{t_1}^{t_2} S_{\kappa} \alpha e^{-at} dt = S_{\kappa} \alpha \int_{t_1}^{t_2} e^{-at} dt \\ &= -S_{\kappa} e^{-at} \Big|_{t_1}^{t_2} = S_{\kappa} (e^{-at_1} - e^{-at_2}). \end{aligned} \quad (17)$$

Задавшись некоторым значением  $t_1$ , можно найти  $t_2$ , т. е. промежуток времени  $\Delta t = t_2 - t_1$ , при котором осадка  $\Delta S$  приобретает некоторую заранее обусловленную величину. Промежуток  $\Delta t$  определяется путем решения уравнения:

$$e^{-at_2} = e^{-at_1} \frac{\Delta S}{S_{\kappa}} = \alpha. \quad (18)$$

Отсюда

$$t_2 = - \frac{\ln \alpha}{a} . \quad (19)$$

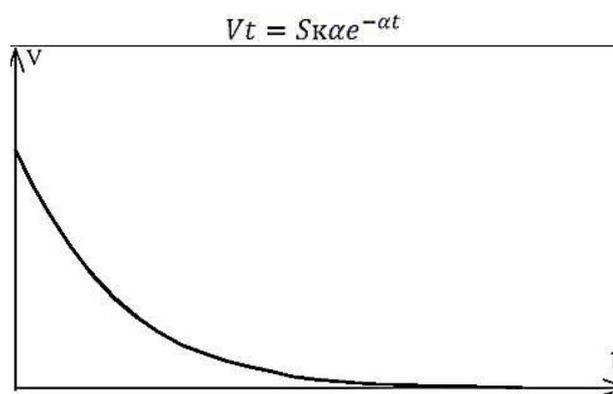


Рисунок 2. График изменения скорости осадки во времени

Практически достаточно принято постоянство относительной величины  $\frac{\Delta S}{S_{\kappa}} = \varepsilon = const$  и для нее найти периоды наблюдений  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ . В этом случае

$$e^{-at_i} = e^{-at_{i-1}} - \varepsilon = \alpha_i . \quad (20)$$

Отсюда

$$t_i = \frac{\ln \alpha_i}{\alpha} \quad (21)$$

Для предварительного расчета использованы данные табл. 1. При этом периоды наблюдений определены относительно  $t_0 = 0$ .

В этом случае

$$e^{-\alpha t_i} = 1 - i\varepsilon. \quad (22)$$

В рассмотренном примере предполагается, что осадка практически стабилизируется через  $t_{20} = \frac{10}{\alpha} = \frac{10}{0,2} = 50$  мес. Девятнадцатый период наблюдений наступает через  $t_{19} \frac{3}{\alpha} = 15$  мес. После этого осадка все же остается равной  $\Delta S = \varepsilon S_K = 0,05 S_K$ .

Выполнен расчет точности наблюдений за осадкой сооружения на основе предположения, что ход этой осадки во времени аппроксимируется экспоненциальной кривой (15), несомненно в других условиях такой ход осадки представляется иными уравнениям.

Результаты наблюдений за различными сооружениями всегда характеризуются некоторыми новыми кривыми, которые могут приобрести общи характер лишь тогда, когда учитывают различные факторы, влияющие на скорость осадки. Большое значение в таком случае приобретает оценка точности определения не относительной, а абсолютной погрешности скорости осадки. Из формулы (6) видно, что стандарт  $\sigma(v)$  зависит от скорости осадки и периода наблюдений.

При уменьшении скорости в  $v$  и увеличении периода наблюдений  $\Delta t$  стандарт  $\sigma(v)$  уменьшается.

Таким образом, расчет точности наблюдений за осадкой сооружения оказался тесно связанным с оценкой изменения скорости осадки.

#### Список литературы:

1. Джалилов Т. Ф., Муниев Д. Д., Раджабов Р. А., Саидов Р. Дж. Прогнозирование осадок инженерных сооружений в районах со сложными инженерно-геологическими условиями // Академик М. С. Осими и развитие культуры: материалы республиканской научно-практической конференции посвященной 90-летию академика М. С. Осими (20 ноября, 2010 г). 2010. С. 208.
2. Николаев С. А. Статистические исследования осадок инженерных сооружений. М. Недра. 1983.
3. Stille H., Palmström A. Practical use of the concept of geotechnical categories in rock engineering // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. V. 79. P. 1-11.
4. Marinos V., Carter T. G. Maintaining geological reality in application of GSI for design of engineering structures in rock // Engineering Geology. 2018. V. 239. P. 282-297.
5. Qin C., Wang K., Li L., Zhou Z., Li S., Liu C. Model Test Study on Spatial Deformation Law of Surrounding Rock for Super-Large Section and Shallow Buried Tunnels // Geotechnical Testing Journal. 2018. V. 42. №. 3.

*References:*

1. Dzhaliylov, T. F., Muniev, D. D., Radzhabov, R. A., & Saidov, R. Dzh. (2010). Prognozirovanie osadok inzhenernykh sooruzhenii v raionakh so slozhnymi inzhenerno-geologicheskimi usloviyami // Akademik M. S. Osimi i razvitie kul'tury: materialy respublikanskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii posvyashchennoi 90-letiyu akademika M. S. Osimi (20 noyabrya, 2010 g). 208.
2. Nikolaev, S. A. (1983). Statisticheskie issledovaniya osadok inzhenernykh sooruzhenii. Moscow. Nedra.
3. Stille, H., & Palmström, A. (2018). Practical use of the concept of geotechnical categories in rock engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 79, 1-11.
4. Marinos, V., & Carter, T. G. (2018). Maintaining geological reality in application of GSI for design of engineering structures in rock. *Engineering Geology*, 239, 282-297.
5. Qin, C., Wang, K., Li, L., Zhou, Z., Li, S., & Liu, C. (2018). Model Test Study on Spatial Deformation Law of Surrounding Rock for Super-Large Section and Shallow Buried Tunnels. *Geotechnical Testing Journal*, 42(3).

*Работа поступила  
в редакцию 10.12.2018 г.*

*Принята к публикации  
14.12.2018 г.*

*Ссылка для цитирования:*

Джалилов Т. Ф. Наблюдения за деформациями инженерных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №1. С. 237-243. Режим доступа: <http://www.bulletennauki.com/38-10> (дата обращения 15.01.2019).

*Cite as (APA):*

Jalilov, T. (2019). Monitoring of deformations of engineering structures in difficult engineering-geological conditions. *Bulletin of Science and Practice*, 5(1), 237-243. (in Russian).