Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №3, Том 6 / 2019, No 3, Vol 6 <https://t-s.today/issue-3-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/17SATS319.pdf>

DOI: 10.15862/17SATS319 (<http://dx.doi.org/10.15862/17SATS319>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Марасанов А.И., Шейкин А.А. Опыт мониторинга объектов инфраструктуры московской железной дороги // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №3, <https://t-s.today/PDF/17SATS319.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/17SATS319

For citation:

Marasnov A.I., Sheikin A.A. (2019). The monitoring experience of Moscow railway infrastructure structures. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/17SATS319.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/17SATS319

УДК 624.159.4

ГРНТИ 67.11.29

Марасанов Александр Игоревич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия
Доцент кафедры «Строительная механика»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: marasnovai@yandex.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8672-8822>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=6938

Шейкин Александр Александрович

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия
Доцент кафедры «Мосты и тоннели»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: a.sheikin@yandex.ru

Опыт мониторинга объектов инфраструктуры московской железной дороги

Аннотация. Представлены результаты научного сопровождения мониторинга объектов инфраструктуры Московской железной дороги при новом строительстве в непосредственной близости от указанных объектов. Оно осуществлялось на основе предложенной приближенной методики оценки осадок этих объектов. Данная методика базируется на применении пошагового способа, согласно которому вычисляются приращения осадок на каждом этапе выполняемых работ (шаге расчета). Полная осадка рассматриваемого объекта определяется суммированием всех полученных таким образом приращений. Методика была применена при научном сопровождении мониторинга путепровода через Минскую улицу линии Москва – Брянск в период усиления фундаментов опор и проходки тоннелей метро, а также при научном сопровождении мониторинга железнодорожной насыпи на участке Москва – пассажирская – Казанская – Электрозаводская в месте пересечения со строящимися тоннелями метро в период проходки данных тоннелей. Применение методики дало следующие результаты. Расчетная осадка опоры 3 путепровода через Минскую улицу после усиления фундаментов опор составила 11,9 мм. Указанная величина, полученная на основе геодезического мониторинга, равна 12,6 мм. Расчетная осадка опоры 3 путепровода после проходки правого тоннеля учетом ранее проведенного усиления фундаментов составила 0,8 мм. Результаты геодезического мониторинга по опоре 3 после проходки левого и правого тоннелей – 2,6 мм. Расчетная осадка

железнодорожной насыпи в результате проходки тоннелей под ней составила 22,6 мм. По результатам геодезического мониторинга данная величина равна 20 мм. Таким образом, можно констатировать, что представленная методика дает удовлетворительные результаты.

Ключевые слова: научное сопровождение мониторинга; методика оценки перемещений; геодезический мониторинг; приращение перемещения; метод конечных элементов; путепровод; железнодорожная насыпь

В последнее время в связи с интенсивным строительством новых линий Московского метрополитена возникают задачи мониторинга напряженно-деформированного состояния объектов инфраструктуры Московской железной дороги, находящихся в непосредственной близости от мест указанного строительства. Необходимость подобного мониторинга регламентируется нормами¹ и особо подчеркивается в научной периодике (см., например, [1–5]).

В представленной работе рассмотрено решение таких задач в отношении путепровода на 5 км ПК8 линии Москва – Брянск через улицу Минская в период усиления фундаментов опор и проходки тоннелей Калининско – Солнцевской линии метрополитена (2013 г.), а также насыпи на участке Москва – пассажирская – Казанская – Электрозаводская в месте пересечения со строящимися перегонными тоннелями метро в период их проходки (2018 г.).

Для численной оценки осадок фундаментов опор путепровода, а также поверхности насыпи предлагается приближенная методика, основанная на применении пошагового способа, согласно которому вычисляются приращения осадок на каждом этапе выполняемых работ (шаге расчета). Полная осадка рассматриваемого объекта определяется суммированием всех полученных таким образом приращений. Реализация указанной методики осуществлялась с помощью метода конечных элементов (МКЭ) на основе программного комплекса MSC Nastran, лицензионная версия которого есть в ИПСС РУТ (МИИТ).

Рассмотрим применение данной методики при мониторинге путепровода через ул. Минская (рис. 1), в период усиления фундаментов опор грунтоцементными сваями (ГЦС) Ø 0,8 м, L = 13,8 м. Данные по физическим и геометрическим характеристикам данного объекта, а также геологии взяты из [6].

Расчетным путем определялись осадки подошвы фундаментной плиты опоры 3, находящейся под стойками 1, 2, 3 и 4 путепровода (см. рис. 2). Указанная плита имеет размеры в плане 10,08×14,35 м. Толщина плиты принята равной 1 м.

Модель МКЭ, описывающая взаимодействие фундаментной плиты опоры 3 с грунтовым массивом, представлена на рис. 3. Она состоит из объемных элементов типа параллелепипедов. Для учета взаимодействия части грунтового массива, включенной в модель, со смежными слоями грунта использованы горизонтальные элементы типа пружин, работающих на сжатие и выключающихся из работы при растяжении. Их параметр жесткости определялся исходя из того, что усредненный коэффициент постели при горизонтальном давлении грунта равен $c = 5000 \text{ кН/м}^3$ (мелкие пески, тугопластичные суглинки, твердые глины, см. [7]).

Расчет осуществлялся следующим образом:

Шаг 0 – расчет на действие постоянной и нормативной временной (С12) нагрузок (заданных нагрузок) фундаментной плиты опоры 3 до проведения работ.

¹ СП 274.1325800.2016. Мосты. Мониторинг технического состояния.

Отметим, что нагрузки передавались на фундаментную плиту в виде сил и моментов, распределенных по площадкам контакта стоек и плиты. Указанные силы и моменты определялись из расчета опоры 3 как плоской рамы.

Шаг 1 – расчет плиты на действие заданных нагрузок, в окрестности которой со стороны опоры 4 с шагом 2,4 м пробурены шурфы $\varnothing 0,8$ м, $L = 13,8$ м для нагнетания раствора на расстоянии $a \approx 2,4$ м от оси, проходящей через центры стоек опоры. Приращение осадки плиты на шаге 1 определялось как разность между перемещениями на шаге 1 и шаге 0: $\Delta_{\text{осадки1}} = \Delta_1 - \Delta_0$.

Шаг 1а – расчет на действие заданной нагрузки с учетом набора прочности бетона в пробуренных шурфах на шаге 1 (бетон класса В15). Считаем, что образовавшиеся таким образом ГЦС в силу технологии их изготовления включаются в работу при восприятии заданной нагрузки.

Шаг 2 – устроены новые шурфы $\varnothing 0,8$ м, $L = 13,8$ м с шагом 2,4 м впритык к образовавшимся ГЦС. Расчет на действие заданной нагрузки. Приращение осадки плиты $\Delta_{\text{осадки2}}$ на шаге 2 определялось как $\Delta_{\text{осадки2}} = \Delta_2 - \Delta_{1a}$.

Далее пошаговый расчет выполнялся аналогичным образом с учетом образования в окрестности фундаментной плиты опоры №3 со стороны опоры №4 сплошной стенки из бетона В15, а затем устройства ГЦС со стороны опоры 2. Суммарная осадка плиты была найдена как сумма всех приращений осадок:

$\Delta_{\text{осадки}} = \sum \Delta_{\text{осадки},i}$. Она составила 11,9 мм. Осадка ригеля опоры 3 по данным геодезического мониторинга – 12,6 мм.

Отметим, что полученные результаты согласуются с утверждением, сделанным в [8] о том, что усиление фундаментов существующих конструкций всегда сопровождается значительных развитием дополнительных осадок сооружений.

Далее рассмотрим применение представленной методики при мониторинге путепровода через ул. Минская в период проходки перегонных тоннелей метро. Модель МКЭ, описывающая взаимодействие фундаментов опор 3 и 4, усиленных ГЦС, с грунтовым массивом при проходке тоннеля получена на основе модели, показанной на рис. 3. План этой модели приведен на рис. 4.

Рисунок 1. Продольный разрез путепровода [6]

Рисунок 2. Поперечное сечение опоры 3 [6]

Определялись перемещения узлов № 1, 2, 3, 4 подошв плит (рис. 4), на следующих шагах расчета:

Шаг 0 – расчет на действие заданной нагрузки на фундаментные плиты опор 3 и 4 до проведения работ.

Шаг 1 – расчет на действие заданной нагрузки при выемке грунта на участке длиной 2 м (см. рис. 4).

Последующие расчетные шаги № 2...9 выполнены в предположении о том, что механические свойства области грунтового массива, изъятый на предыдущем шаге, условно восстановлены и новая область изъятия грунта соответствует номеру шага (см. рис. 4).

Рисунок 3. Модель МКЭ, имитирующая взаимодействие фундаментной плиты опоры №3 с грунтовым массивом (разработано автором)

Осадки плит на i -м шаге расчета вычислялись путем разности перемещений i -го расчетного шага и нулевого расчетного шага. К полученным величинам прибавлялись значения осадок, найденные на расчетном шаге $i-1$.

Результаты данного расчета таковы. После проходки правого тоннеля Калининско-Солнцевской линии метрополитена дополнительная расчетная осадка фундаментных плит опор 3 и 4 с учетом ранее проведенного усиления фундаментов составила 0,8 мм и 0,7 мм

соответственно. Результаты геодезического мониторинга по опоре 3 после проходки левого и правого тоннелей – 2,6 мм.

Далее рассмотрим применение представленной методики при мониторинге осадок насыпи на участке Москва – пассажирская – Казанская – Электрозаводская в месте пересечения со строящимися перегонными тоннелями метро в период их проходки. Отметим, что угол между осью железнодорожной насыпи и осью проходки в точке пересечения этих осей составляет 44^0 . Четыре железнодорожных пути на длине 65 м в окрестности точки пересечения оси железнодорожной насыпи и оси проходки загружены временной нагрузкой С12. Кроме того была учтена постоянная нагрузка (собственный вес насыпи, грунтового массива и железобетонной тоннельной обделки).

Временная нагрузка прикладывалась в виде системы сосредоточенных сил, приложенных в узлах модели, соответствующих поверхности насыпи. Высота насыпи в соответствии с имеющимися данными принята равной 7,74 м. Высота грунтового массива над строящимися тоннелями принята равной 13,51 м. Согласно данным геологии под строящимися тоннелями расположен мергель средней толщиной 8,5 м. В их окрестности, а также над ними – пески средней крупности и твердые и полутвердые глины. Из-за нерегулярности расположения слоев различных грунтов и близости их механических характеристик было принята следующая модель грунтового массива: насыпь и поверхностный слой грунтовой толщи мощностью 3,51 м состоят из насыпного грунта в виде суглинка тугопластичной консистенции (модуль деформации $E = 6$ МПа, объемный вес $\rho = 1,85$ г/см³ и коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$). Ниже, между насыпным поверхностным грунтом и верхом строящихся тоннелей, а также в их окрестности находится грунт с усредненными характеристиками: $E = 22$ МПа, $\rho = 1,9$ г/см³, $\mu = 0,35$ (мощность слоя – 10 м). Под строящимися тоннелями расположен мергель с мощностью слоя 8,5 м. Для него $E = 2 \times 10^4$ МПа; $\mu = 0,23$ (см. [9]).

Рисунок 4. План модели с указанием нумерации шагов расчета (разработано автором)

Модель МКЭ, описывающая поведение насыпи и грунтового массива при проходке перегонных тоннелей, представлена на рис. 5. Она состоит из 4-х, 6-ти и 8-ми угольных объемных элементов. В модели рассмотрен участок грунтового массива длиной 106,5 м (в направлении вдоль оси проходки) и шириной 219 м (в направлении, перпендикулярном оси проходки).

В процессе проходки осуществлялся мониторинг осадок точки на поверхности насыпи на пересечении оси железнодорожной насыпи и оси проходки, а также точки поверхности земли на расстоянии более 109,5 м от оси проходки. Расчет осуществлялся по шагам.

Шаг 0 – рассматривается исходное состояние грунтового массива. Определяются перемещения контрольных точек. Затем считаем, что при проходке левого тоннеля произошло изъятие грунта на длине 6 м на расстоянии $(53,25 - 3) = 50,25$ м от точки пересечения оси насыпи и оси проходки. После чего расчетным путем фиксируются перемещения контрольных точек. Разность между соответствующими величинами дает осадку грунта в контрольных точках на шаге 0.

Шаг 1 – предполагается, что на длине 6 м предыдущего шага установлена тоннельная обделка (бетон класса В30). Определяются перемещения контрольных точек. Затем изымается грунт на следующих 6 метрах на расстоянии $(53,25 - 9) = 44,25$ м от точки пересечения оси насыпи и оси проходки, определяются перемещения контрольных точек, а также разность соответствующих перемещений (приращение перемещений). Осадки контрольных точек на шаге 1 найдем, прибавляя осадки на предыдущем шаге к полученным приращениям. Далее аналогичным путем осуществляется расчетный шаг 2 и последующие расчетные шаги.

Таким способом осуществляется расчет осадок контрольных точек при проходке сначала левого, а затем и правого тоннелей.

Итоговая осадка железнодорожной насыпи на участке Москва – пассажирская – Казанская – Электrozаводская в месте пересечения с перегонными тоннелями после их проходки составила 22,6 мм. Данные геодезического мониторинга – 20 мм.

В заключение, можно констатировать, что полученные результаты подтверждают целесообразность применения представленной методики при мониторинге объектов транспортной инфраструктуры.

Рисунок 5. Модель МКЭ железнодорожной насыпи и грунтового массива (разработано автором)

ЛИТЕРАТУРА

1. Мониторинг строительных конструкций зданий и сооружений. Петров А.В., Еремеева А.И. Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. 2015. № 6. С. 43–45.
2. Kim J.-T., Sim S.-H., Cho S., Yun C.-B., Min J. Recent R&D activities on structural health monitoring in Korea // Structural Monitoring and Maintenance. 2016. № 1(3). Pp. 91–114.
3. Ryu H.-H., Kim J.-S., Choi E.-G., Lee S.-H. Preliminary design of structural health monitoring for high-rise buildings // International Journal of High-Rise Buildings. 2017. № 3(6). Pp. 279–284.
4. Brownjohn J.M.W. Structural health monitoring of civil infrastructure // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2007. № 1851(365). Pp. 589–622.
5. Мониторинг технического состояния ответственных сооружений с использованием современных геодезических методов измерений и численного анализа методом конечных элементов / А.В. Коргин, М.А. Захарченко, В.А. Ермаков // Мониторинг. Наука и безопасность – 2011 – №3. С. 58–63.
6. Разработка проектной документации на укрепление грунтов при щитовой проходке перегонных тоннелей метро под ж.д. путепроводом через ул. Минская на 5 км ПК6 линии Москва-Брянск Московской ж.д. ОАО ЦНИИС. М., 2013. 33 с.
7. Горбунов-Посадов М.И., Ильичев В.А., Крутов В.И. Основания, фундаменты и подземные сооружения. (Справочник проектировщика). Под общей редакцией Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофимова, М. – Стройиздат, 1985. 480 с.
8. Знаменский В.В., Чунюк Д.Ю., Морозов Е.Б. К вопросу о снижении осадок окружающей застройки при новом строительстве. В сборнике: Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций // Сборник научных статей XX научно-методической конференции ВИТУ (29 марта 2016 года) / ВИ(ИТ) ВА МТО (ВИТУ). – СПб., 2016. – сс. 11–13.
9. М.Г. Зерцалов. Механика скальных грунтов и скальных массивов. М.: ИД «Юриспруденция», 2003. – 184 с.

Marasanov Alexander Igorevich

Russian university of transport (MIIT), Moscow, Russia
E-mail: marasanovai@yandex.ru

Sheikin Alexander Alexandrovich

Russian university of transport (MIIT), Moscow, Russia
E-mail: a.sheikin@yandex.ru

The monitoring experience of Moscow railway infrastructure structures

Abstract. The scientific support results of monitoring of Moscow railway infrastructure structures during new construction in close proximity to these structures are represented. This scientific support was realized by means of proposed procedure of displacement estimation of given points of these structures. This procedure is based on application of numerical method. Due to this method displacement increments are computed on each step of building operations (step of solution). The total displacement of considered structure is obtained by summation of all obtained displacement increments. This procedure was applied for scientific support of monitoring of two railway structures. One of them is overbridge across Minskaya street on Moscow – Bryansk line during strengthening of its supports and tunneling in perpendicular direction to railway line. The other is embankment of line Moscow – Kazan during tunneling. Computed displacement of base of overbridge support N 3 after strengthening of support bases is equal to 11,9 millimeter's. This value obtained by means of geodesic monitoring is equal to 12,6 millimeter's. Computed displacement of base of overbridge support N 3 after construction of right tunnel is equal to 0,8 millimeter's. This value obtained by geodesic monitoring after construction of left and right tunnels is equal to 2,6 millimeter's. Computed displacement of embankment after tunneling is equal to 22,6 millimeter's. This value obtained by geodesic monitoring is equal to 20 millimeter's. So the proposed procedure gave satisfactory results.

Keywords: scientific support of monitoring; procedure of displacement estimation; geodesic monitoring; displacement increment; finite element method; overbridge; embankment

REFERENCES

1. Petrov A.V., Ereemeeva A.I. (2015). Monitoring of building structures of buildings and structures. *Industrial safety expertise and diagnostics of hazardous production facilities*, 6, p. 43–45 (in Russian).
2. Kim J.-T., Sim S.-H., Cho S., Yun C.-B., Min J. (2016). Recent R&D activities on structural health monitoring in Korea. *Structural Monitoring and Maintenance*, 1(3), pp. 91–114.
3. Ryu H.-H., Kim J.-S., Choi E.-G., Lee S.-H. (2017). Preliminary design of structural health monitoring for high-rise buildings. *International Journal of High-Rise Buildings*, 3(6), pp. 279–284.
4. Brownjohn J.M.W. (2007). Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 1851(365), pp. 589–622.
5. Korgin A.V., Zakharchenko M.A., Ermakov V.A. (2011). Monitoring the technical condition of critical structures using modern geodetic measurement methods and numerical analysis by the finite element method. *Monitoring. Science and Security*, 3, pp. 58–63 (in Russian).
6. (2013). Razrabotka proektnoy dokumentatsii na ukreplenie gruntov pri shchitovoy prokhodke peregonnykh tonneley metro pod zh.d. puteprovodom cherez ul. Minskaya na 5 km PK6 linii Moskva-Bryansk Moskovskoy zh.d. [*Development of design documentation for soil strengthening during paneling of distillation subway tunnels under the railway overpass over the street. Minskaya at 5 km PK6 of the Moscow-Bryansk line of the Moscow railway.*] Moscow: TsNIIS OJSC, p. 33.
7. Gorbunov-Posadov M.I., Il'ichev V.A., Krutov V.I. (1985). Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya. (Spravochnik proektirovshchika). Ed. by E.A. Sorochan, Yu.G. Trofimov. [*Foundations, foundations and underground structures. (Designer Handbook).*] Moscow: Stroyizdat, p. 480.
8. Znamenskiy V.V., Chunyuk D.Yu., Morozov E.B. (2016). K voprosu o snizhenii osadok okruzhayushchey zastroйки pri novom stroitel'stve. V sbornike: Defekty zdaniy i sooruzheniy. Usilenie stroitel'nykh konstruktsiy. [*On the issue of reducing the precipitation of the surrounding buildings during new construction. In the collection: Defects of buildings and structures. Strengthening building structures.*] Saint Petersburg: Military Institute (Engineering) of the Military Academy of Logistics (Military Engineering University), pp. 11–13.
9. Zertsalov M.G. (2003). Mekhanika skal'nykh gruntov i skal'nykh massivov. [*Mechanics of rocky soil and rock massifs.*] Moscow: Publishing House "Jurisprudence", p. 184.