УДК 624.151.2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ОСАДОК ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Канд. тех. наук, доцент **Н.А. Устян**
(ООО «ГЕО-ПРОЕКТ»)
Конт. информация: +7 (921) 397-97-36;
nagapet_ustyan@mail.ru

В статье рассматривается новый геофизический метод измерения осадок слабых грунтовых оснований насыпей транспортных сооружений. Приведены организационные и технические особенности проведения измерений, показана новизна предлагаемого метода, его технические особенности и экономическая целесообразность применения.

***Ключевые слова**: насыпи автомобильных и железных дорог, слабое грунтовое основание, инклинометрия, измерение осадок.*

Строительство автомобильных и железных дорог, других транспортных сооружений всегда связано с преодолением участков на слабых грунтовых основаниях. Возведение земляного полотна на них требует применения более сложных инженерных решений и методов возведения. Для этого очень важно контролировать соответствие режима отсыпки насыпи расчетным срокам, динамику консолидации грунтов слабого основания, величину осадки насыпи после отсыпки очередного слоя грунта. Пренебрежение этими условиями может привести к непоправимым последствиям – выпору основания насыпи, просадкам, сползанию откосов, а порой и обрушению откосов или участка насыпи в целом.

Поэтому для исключения подобных случаев предусматривается геотехнический мониторинг (наблюдение) участков дорог на слабых грунтовых основаниях в период их строительства, а в ряде случаев и при эксплуатации **[1**, **2]**. При этом необходимо наблюдать не только за осадками насыпи, но и за горизонтальными смещениями откосов выемок и склонов. От своевременной и полной информации о состоянии слабого основания зависит ход строительства и риски возникновения нештатных ситуаций, связанные с потерей прочности основания и устойчивости откосов насыпей.

В настоящее время для измерений вертикальных (осадок) и горизонтальных (сползания откосов) деформаций земляного полотна

используют визуально-инструментальные геодезические и геофизические методы. Измерения могут производиться с применением нивелиров, теодолитов, тахеометров, сканеров (в том числе оптических, электронных, лазерных) и навигационных спутниковых систем. Из приведенных методов наиболее часто используется визуально-инструментальные и геодезические методы, так как другие методы гораздо дороже и сложнее.

Например, для измерения осадок чаще всего применяют геодезический метод с установкой осадочных марок на основание насыпи в начальный период ее отсыпки **[3]**. Это позволяет контролировать осадки земляного полотна на период его возведения.

Как правило, для измерения одного поперечника устанавливаются по три марки в основании насыпи, через каждые 50 м между поперечниками **(рис. 1)**.

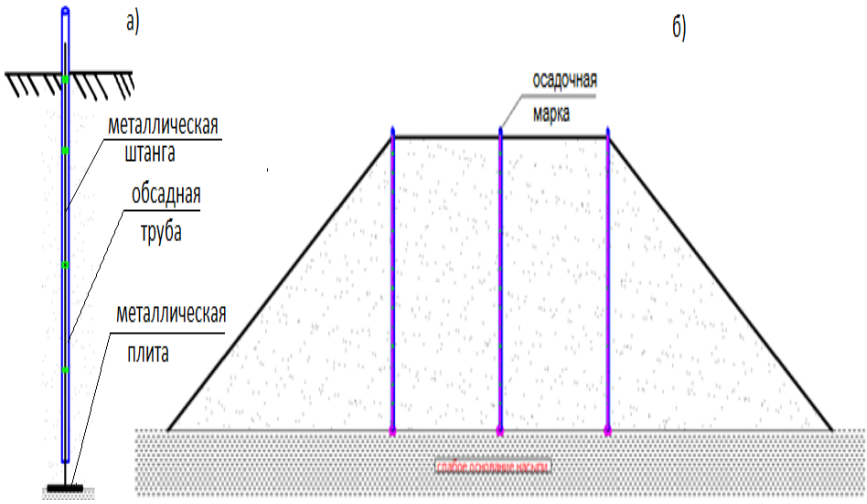

Рис. 1. Осадочная марка (а) и схема их установки в насыпи (б)

Данный метод применяется чаще других, хотя и имеет ряд существенных недостатков, к которым относятся:

- снижение темпов возведения земляного полотна, так как установленные марки ограничивают маневр техники при отсыпке насыпи;
- большая вероятность повреждения или уничтожения части установленных марок строительной техникой и необходимость их восстановления;
- ухудшение достоверности данных, полученных с использованием восстановленных марок;

– получение данных только по трем контрольным точкам поперечного профиля земляного полотна при ширине основания насыпи от 20 до 80 м (это дает примерную оценку деформированного состояния);
– невозможность проведения мониторинга насыпи после устройства дорожной одежды автомобильной дороги, так как марки будут засыпаны;
– часто марки устанавливают без обсадной трубы, что приводит к неточным результатам измерений.

Учитывая указанные выше недостатки, данные, полученные с использованием осадочных марок, могут быть неполными и приблизительными. Вследствие этого состояние слабого основания насыпи оценивается неверно, что напрямую влияет на безопасность строительства и эксплуатации дорог и сооружений. На практике это означает дальнейшие просадки уже готовой насыпи, образование продольных или поперечных трещин в недавно уложенной дорожной одежде, сползание откосов и т.д.

Поэтому совершенствование методов измерений деформаций и, в частности, осадок земляного полотна, дающих более полную и достоверную информацию о состоянии слабых грунтов оснований, является актуальной задачей, требующей решения.

В транспортном строительстве с 80-х годов прошлого века за рубежом стали применять инклинометрический метод измерения горизонтальных смещений откосов выемок, стенок котлованов и склонов. Вертикальные осадки насыпей данным методом практически не измерялись ввиду технических трудностей и отсутствия соответствующей методики измерений и оборудования.

При строительстве развязки на пересечении кольцевой автодороги вокруг г. Санкт-Петербурга с Пискаревским проспектом в 2008 г., автором данной статьи был изобретен и предложен к внедрению новый геофизический метод, предназначенный для измерения осадок слабых грунтовых оснований насыпей транспортных сооружений с применением принципов инклинометрии. Позднее после внедрения и апробации предложенного метода был получен патент на изобретение **[4]**.

Данный метод позволяет производить измерения осадок насыпей по всей ширине основания земляного полотна, в любой его точке с применением инклинометра. Инклинометр представляет собой датчик, разработанный на основе технологий MEMS (англ. microelectromechanical systems – микроэлектромеханические системы), и позволяет измерять углы наклона (по оси X) своей траектории. Инклинометр помещен в металлический зонд, который входит в состав портативного инклинометрического комплекта. Измерения производят через специально

проложенный в основании насыпи инклинометрический измерительный канал (ИИК) из специальных пластиковых труб, который является измерительной траекторией для зонда, производящего измерения.

ИИК укладывают на выровненное основание насыпи до начала его отсыпки через каждые 20-50 м **(рис. 2)**.

Рис. 2. Укладка инклинометрического измерительного канала на съезде № 1 (КАД вокруг Санкт-Петербурга, 2008 г.)

При составлении программы геомониторинга определяется необходимое количество ИИК в зависимости от грунтовых характеристик основания и длины наблюдаемого участка. Перед монтажом ИИК в него вставляется протяжный шнур, предназначенный для протаскивания зонда внутри канала во время измерений.

Для обеспечения проезда строительной техники и фиксации ИИК его засыпают слоем грунта и производят первичное измерение вертикальных углов наклона с составлением эталонного графика. В последующем с ним сравниваются все измерения (графики) и определяют величины осадок в каждой точке канала.

Измерения проводятся инженером-геофизиком и техником при помощи портативного инклинометрического комплекта с соответствующим программным обеспечением для получения, обработки и передачи данных **(рис. 3)**.

Рис. 3. Портативный инклинометрический комплект УСМ-ИСП

Суть измерения осадок методом инклинометрии состоит в том, что ИИК из пластиковых труб, уложенный поперек оси дороги, при осадке насыпи изгибается одновременно с массивом грунта основания, образуя новую траекторию, которая отличается от эталонной. Каждая точка его оси приобретает новое значение вертикального угла наклона $\propto_i$ относительно вектора силы тяжести *G* **(рис. 4)**. При перемещении инклинометрического зонда внутри трубы с установленным шагом измеряется угол между вектором силы тяжести *G* и осью зонда в каждой точке измерения за 3-5 с. Значение угла, полученное от инклинометра, инженер-геофизик наблюдает на экране считывающего устройства и после его фиксации дает команду технику перетянуть зонд протяжным шнуром на следующую точку. Расстояние между точками измерений равно базовой длине инклинометрического зонда (50 см).

В такой последовательности измеряют углы наклона по всей длине ИИК через каждые 50 см. По достижении последней точки инженер вытаскивает зонд из измерительного канала, отсоединяет его от кабеля, переворачивает и присоединяет к разъему с другой стороны инклинометра.

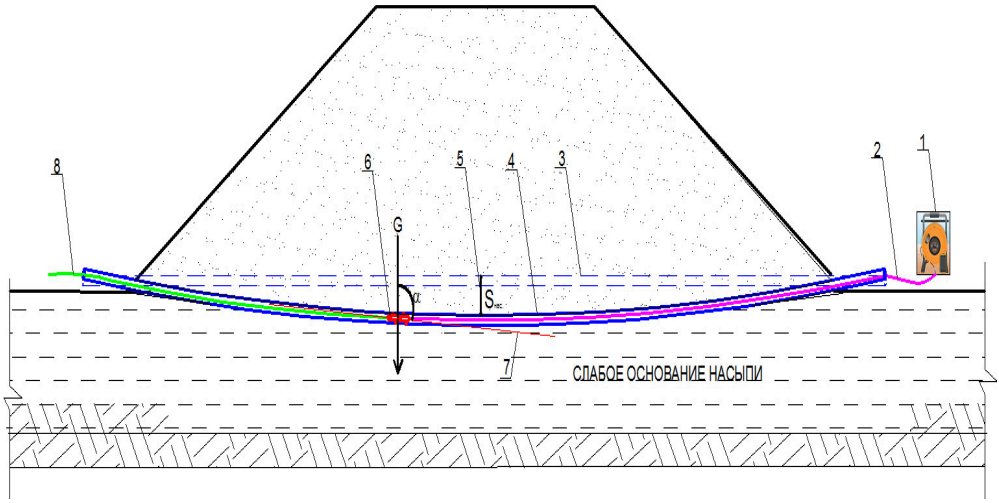

Рис. 4. Принципиальная схема измерения осадок портативным инклинометрическим измерительным комплектом:
1 – портативный инклинометрический комплект;
2 – кабель инклинометра; 3 – инклинометрический измерительный канал до осадки насыпи; 4 – инклинометрический измерительный канал после осадки насыпи; 5 – величина осадки насыпи;
6 – инклинометрический зонд; 7 – протяжной шнур

После этого все измерения выполняются по тем же точкам для определения среднеквадратической ошибки. Данные измерений сохраняются в специальных электронных журналах наблюдений портативного комплекта и переводятся в формат Excel. Результаты обрабатываются прикладной программой считывающего устройства и сразу выдаются в виде инклинограммы или таблиц **(рис. 5)**. При необходимости их можно передать по интернету на другой компьютер и обработать отдельно.

Измерения одного канала (туда-обратно) в среднем занимает 15-20 мин. Величина осадки определяется путем сравнения полученных данных с эталонными, которые были получены после укладки ИИК. Точность измерений составляет ± 0,05 % измерительного диапазона (± 0,26 мм/м для диапазона ± 30°), что соответствует требованиям ГОСТ 24846 **[5]**. При практических и экспериментальных измерениях осадок насыпи при длине ИИК 30 м ошибка составляла не более 1 мм.

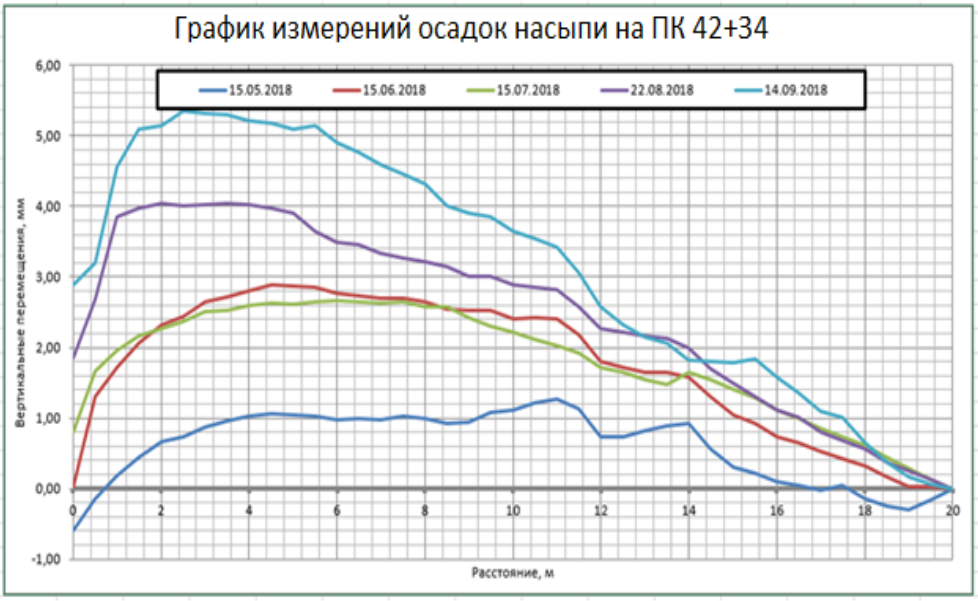

Рис. 5. Инклинограмма измерений осадок насыпи

После обработки полученных данных определяют величину осадки насыпи (достигнута или нет расчетная осадка), скорость прироста осадок за истекший срок и динамику консолидации грунтов в целом. На основании полученных данных могут быть подготовлены рекомендации о возможности отсыпки последующих слоев или устройства дорожной одежды на наблюдаемом участке насыпи.

Предлагаемый метод позволяет измерять вертикальные деформации насыпи за короткий срок с большой точностью, что значительно сокращает затраты на проведение геотехнического мониторинга. Для сравнения экономической эффективности предлагаемого метода было произведено сопоставление с геодезическим методом с применением осадочных марок на реальном объекте (подходы к путепроводу на дороге А 114) длиной участка 380 м **[6]**. Поскольку сметная стоимость устройства измерительной сети для геомониторинга данного участка с применением осадочных марок была известна, производился такой же расчет стоимости устройства инклинометрической измерительной сети для того же участка. Сравнение вариантов приведено в **табл. 1**.

Таблица 1

Сравнение экономических показателей измерительных систем

Показатели	*Длина участка, м*	*Кол-во попереч-ников, шт.*	*Кол-во осадоч-ных марок, шт.*	*Кол-во опорных реперов, шт.*	*Кол-во изм. ка-налов, шт.*	*Стоимость ПИР, руб.*	*Стоимость СМР, руб.*	*Трудозатраты, чел. - ч*	*Всего по объекту, руб.*
Обустройство участка наблю-дения осадоч-ными марками	380	20	60	2	-	**982 370**	**804 494**	**339**	**1 786 864**
Устройство инклинометри-ческой измерительной сети	380	20	-	-	20	**117 060**	**232 834**	**104**	**349 894**
Разница между методами, руб.						**865310**	**571 660**	**235**	**1 436 970**

Сравнение методов показывает, что для выбранного участка стоимость измерений осадок с применением геофизического метода в целом по объекту в 5,1 раза ниже, чем геодезического метода. При этом стоимость проектно-изыскательских работ ниже в 8,4 раза, строительно-монтажных – в 3,5 раза, а трудозатраты на устройство сети – в 3,3 раза. Кроме этого, при проведении измерений методом инклинометрии не снижаются темпы производства работ по возведению насыпи и значительно повышается точность измерений. Предложенный метод позволяет отобразить изменения основания насыпи по всей ширине, и поскольку ИИК находится в теле насыпи, он практически не повреждается строительной техникой. Измерения могут быть проведены при необходимости в любое время – как при строительстве земляного полотна дороги, так и при последующей эксплуатации участка. К тому же этот метод гораздо проще существующих как при устройстве измерительной системы, так и при проведении самого мониторинга.

Следует отметить, что к использованию геофизического метода проведения геомониторинга была проявлена заинтересованность со стороны Федерального дорожного агентства (Росавтодор), по заказу которого силами ООО «ГЕО-ПРОЕКТ» была выполнена научно-исследовательская работа (НИР). По итогам данной работы разработан документ – ОДМ 218.5.015-2019 «Методические рекомендации по измерению деформации земляного полотна автомобильных дорог с применением принципов инклинометрии». В рамках данной НИР были выполнены стендовые испытания с целью подтверждения заявленных параметров по точности измерений. Исследования проводились в лаборатории Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. Суть экспериментов заключалась в получении и сопоставлении величин прямых измерении прогиба ИИК с измерениями инклинометром при различных конфигурациях измерительного канала из пластиковых труб **(рис. 6)**.

Полученные результаты полностью подтвердили заявленную точность на всех сериях испытаний с результатом совпадения на 99 %.

Рис. 6. Проведение стендовых испытаний по измерению осадок инклинометром

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что использование инклинометрии, имеющей в своей основе передовые разработки в микроэлектронике, существенно расширяет возможности получения информации о действительном состоянии развития деформаций основания и откосов насыпей на любом этапе их жизненного цикла и на всем участке дороги, на котором проводится геотехнический мониторинг. Достоверная оценка состояния объекта позволяет повысить уровень безопасности и качества строительства автомобильных и железных дорог.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *ГОСТ 33179-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Изыскания мостов и путепроводов. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2017. – 36 с.*
2. *ГОСТ 32868-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению инженерно-геологических изысканий. – М.: Стандартинформ, 2015. – 57 с.*
3. *Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. – М.: Минтранс РФ, 2003. – 218 с.*
4. *Патент на изобретение № 2714536 Российская Федерация. Система инклинометрических измерений осадок насыпей и способ измерений для такой системы / Устян Н.А.; патентообладатель: Устян Нагапет Амирханович. – № 2018143573; заявл. 07.12.2018; опубл. 18.02.2020. Бюл. № 5.*
5. *ГОСТ 24846-2012. Грунты. Методы измерений деформаций оснований зданий и сооружений. – М.: Стандартинформ, 2019. – 18 с.*
6. *Рабочая документация по объекту «Реконструкция мостового перехода через реку Волхов на км 122+085 автомобильной дороги М-18 «Кола» – от Санкт-Петербурга через Петрозаводск, Мурманск, Печенгу до границы с Норвегией (международный автомобильный пункт пропуска «Борисоглебск») в Ленинградской области».*

L I T E R A T U R A

1. *GOST 33179-2014. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Izyskaniya mostov i puteprovodov. Obshchie trebovaniya. – M.: Standartinform, 2017. – 36 s.*
2. *GOST 32868-2014. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Trebovaniya k provedeniyu inzhenerno-geologicheskih izyskanij. – M.: Standartinform, 2015. – 57 s.*
3. *Posobie po proektirovaniyu zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog na slabyh gruntah. – M.: Mintrans RF, 2003. – 218 s.*
4. *Patent na izobretenie № 2714536 Rossijskaya Federaciya. Sistema inklinometricheskih izmerenij osadok nasypej i sposob izmerenij dlya takoj sistemy / Ustyan N.A.; patentoobladatel': Ustyan Nagapet Amirhanovich. – № 2018143573; zayavl. 07.12.2018; opubl. 18.02.2020. Byul. № 5.*

5. *GOST 24846-2012. Grunty. Metody izmerenij deformacij osnovanij zdanij i sooruzhenij. – M.: Standartinform, 2019. – 18 s.*
6. *Rabochaya dokumentaciya po ob"ektu «Rekonstrukciya mostovogo perekhoda cherez reku Volhov na km 122+085 avtomobil'noj dorogi M-18 «Kola» – ot Sankt-Peterburga cherez Petrozavodsk, Murmansk, Pechengu do granicy s Norvegiej (mezhdunarodnyj avtomobil'nyj punkt propuska «Borisoglebsk») v Leningradskoj oblasti».*

……

TECHNOLOGICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF INCLINOMETRIC METHOD OF SETTLEMENT MEASUREMENT OF EARTH ROADBED OF TRANSPORT STRUCTURES

Ph. D. (Tech.), Associate Professor ***N.A. Ustyan***
(«GEO-PROJECT» LLC)
Contact information: +7 (921) 397-97-36;
nagapet_ustyan@mail.ru

The article considers a new geophysical method of measuring the settlements of embankments on weak soil bases of transport structures. The organizational and technical peculiarities of the measurement are presented, the novelty of the proposed method, its technical features and the economic feasibility of its application are shown.
Key words: *road and railway embankments, weak soil base, inclinometry, settlement measurement.*

Рецензент: канд. техн. наук Н.Н. Беляев (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 02.04.2021 г.