

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2019, №1, Том 6 / 2019, No 1, Vol 6 <https://t-s.today/issue-1-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/10SATS119.pdf>

DOI: 10.15862/10SATS119 (<http://dx.doi.org/10.15862/10SATS119>)

Статья поступила в редакцию 15.01.2019; опубликована 05.03.2019

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Куликов А.В. Измерение напряжений в грунтах модернизированными датчиками // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №1, <https://t-s.today/PDF/10SATS119.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/10SATS119

**For citation:**

Kulikov A.V. (2019). Measurement of stresses in soils with modernized sensors. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/10SATS119.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/10SATS119

**УДК 624.131**

**ГРНТИ 67.11.29**

**Куликов Александр Владимирович**

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия  
Ассистент

E-mail: [zeeebr@mail.ru](mailto:zeeebr@mail.ru)

РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=201965](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=201965)

## **Измерение напряжений в грунтах модернизированными датчиками**

**Аннотация.** Данная статья посвящена модернизации кустарно изготавливаемых датчиков для измерения напряжений в грунте (мессдоз). На сегодняшний день при проектировании зданий и сооружений важной задачей является определение величины ожидаемой осадки. Не всегда расчетные значения объективны, особенно в условиях Западной Сибири, где распространены слабые органоминеральные грунты. Опираясь на опыт внедрения датчиков измерения напряжений в грунте, автором был выявлен ряд факторов, по которым они вероятнее всего выходят из строя. По примерным подсчетам до конца среднестатистического натурального эксперимента остаются работоспособными около 25 % мессдоз. Автором предложены варианты модернизации датчиков для минимизации рисков выхода их из строя. Основные причины отказа датчиков: обрыв контактов, разгерметизация, короткое замыкание. Они устраняются внедрением в корпус датчика платы из стеклотекстолита и двухэтапной герметизацией. Корпус датчиков изготавливался из титана. Для наклейки тензорезисторов на корпус мессдозы использовался цианакрилатный клей. Герметизация выполнялась эпоксидной смолой. В качестве сигнального кабеля использовался 4-х жильный кабель КСПВ. Тарировка датчиков проводилась в азростатическом баке. Модернизированные датчики опробованы в ходе лабораторного эксперимента. Автор испытывал образец слабого органоминерального грунта в условиях компрессионного сжатия. Ни один датчик общего давления не вышел из строя. Сходимость показаний датчиков с прилагаемой на образец нагрузкой весьма высока. Погрешность измерений не превысила 10 %. Также автором была предпринята попытка кустарного изготовления датчиков для измерения поровых давлений в грунте, но в ходе внедрения все они вышли из строя.

**Ключевые слова:** мессдоза; компрессионное сжатие; напряжение в грунте; тензорезистор; органоминеральный грунт; цианакрилатный клей; стеклотекстолит; тарировка

## Введение

Одной из важнейших задач проектирования оснований и фундаментов является определение величины ожидаемой осадки зданий и сооружений. Однако сопоставление рассчитанных и наблюдаемых осадок показывает, что не всегда эта задача решается успешно, особенно при строительстве на слабых грунтах. Развитие недопустимых осадок, превышающих рассчитанные иногда в несколько раз, ведет к повышению неравномерной деформации сооружений и их аварийному состоянию.

Причинами низкой точности расчетов осадок являются, с одной стороны, несовершенство инженерных методов расчета, а с другой – недостатки методики определения деформационных характеристик при инженерно-геологических изысканиях.

Методы расчета осадок и методика определения механических свойств грунтов постоянно совершенствуются. Главными задачами при создании новых и усовершенствовании существующих методов расчета являются определение напряжений, развивающихся под нагрузкой от сооружения в массиве грунта и на контакте с фундаментами, величины зоны деформации и исследование деформаций по их простираению в основании сооружения.

Теоретические основы методов измерения напряжений и деформаций в грунтах, особенно их метрологическая часть, до настоящего времени являются наименее изученными, а потому требуют привлечения особого внимания исследователей.

Истинная картина напряженного состояния грунта, являющегося многофазной системой, состоящей из минеральных частиц, поры между которыми заполнены водой и газами, необычайно сложна. Напряженное состояние может рассматриваться как комплекс взаимодействующих контактных напряжений в точках соприкосновения минеральных частиц, напряжений в теле самих частиц, давления в жидкости и газах, заполняющих поры грунта.

При этом в процессе взаимного смещения частиц при уплотнении грунта меняются точки их соприкосновения, а следовательно, и напряжения в самих частицах и на контактах. Различие конфигураций, размеров и деформативных свойств частиц создает огромное разнообразие и неповторимость напряженных состояний, которые можно описать только статистическими методами.

В связи с этим при решении инженерных задач делается допущение, что нормальное или касательное напряжения по какой-нибудь площадке равны среднеинтегральному значению проекции истинных напряжений соответственно на нормаль или касательную к этой площадке.

Среднеинтегральные значения напряжений с достаточной степенью точности и достоверности коррелируют с прочностными и деформативными свойствами грунтов, а поэтому вполне удовлетворяют требованиям инженерных задач.

Однако в научных целях эти напряжения могут использоваться только при рассмотрении феноменологических моделей грунта. При создании физических моделей необходимо знать истинное напряженное состояние грунта. Отметим, что истинные напряжения в точках контактов частиц грунта могут на два порядка превышать среднеинтегральное напряжение по площадке.

С учетом допущения о среднеинтегральном напряжении напряженное состояние в исследуемой точке грунтового массива может быть определено тензором напряжений, т. е. в

том случае, когда известны шесть независимых его компонентов (например, значение нормальных напряжений по шести различно ориентированным площадкам).

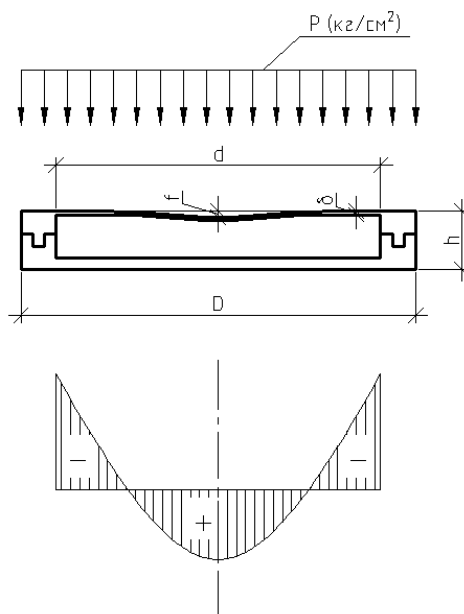
Поэтому задача экспериментального изучения напряженного состояния грунта сводится к определению нормальных напряжений по различно ориентированным площадкам. Для этого применяются датчики нормальных напряжений – мессдозы, которые помещаются в грунт и контактируют своими чувствительными элементами с частицами грунта, поровой водой и газом.

Простейшие мессдозы имеют обычно форму цилиндрического диска, одна или две плоскости которого являются чувствительными элементами – мембранами, заделанными по контуру (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Общий вид мессдозы<sup>1</sup>

Мессдоза измеряет среднеинтегральное значение нормального напряжения в грунте по площади мембраны, которая прогибается под действием измеряемого напряжения (рисунок 2).



**Рисунок 2.** Схема мессдозы с одной чувствительной плоскостью (составлено автором)

Деформации внутренней поверхности мембраны (удлинение в центре и укорочение на опоре) преобразуются наклеенными на мембрану тензорезисторами в электрический сигнал, который по каналу связи передается на вторичный прибор измерительной системы. Сигнал вторичного прибора с помощью тарировочного графика расшифровывается как нормальное напряжение, действующее на мессдозу.

<sup>1</sup> Датчик давления грунта ВЕЕ-А/ВЕФ-А [Электронный ресурс] // Группа компаний NDT-TD. – Режим доступа: <http://www.ndt-td.ru/katalog/tenzometricheskoe-oborudovanie/tenzometricheskie-datchiki/datchiki-davleniya/datchik-davleniya-grunta-bee-abef-a.html>.

К настоящему времени исследователи не располагают методикой и приборами для непосредственного измерения напряжений. Все известные приборы, в том числе и мессдозы, фиксируют только деформации среды, в которой они установлены. Измеренные деформации с помощью тарировочных графиков или по формулам, отвечающим модели исследуемой среды (например, по формулам теории упругости), расшифровываются как напряжения в среде.

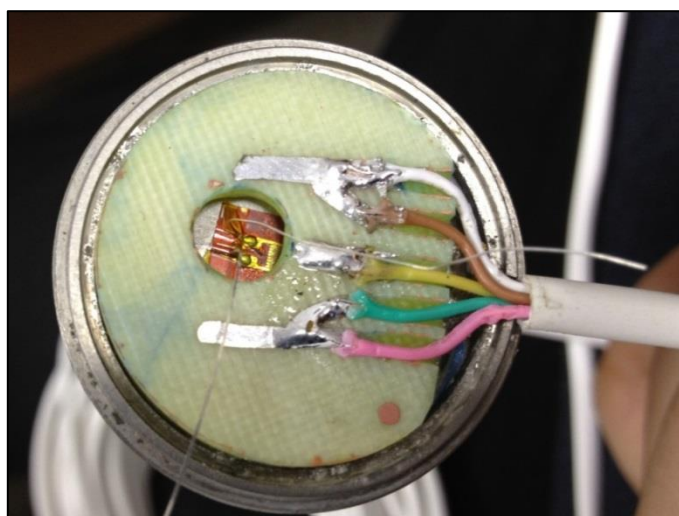
### Экспериментальная часть

В ходе сборки и внедрения на различных объектах и экспериментах большого (более 500) количества датчиков [1; 2; 3], изготовленных по «классической схеме» (разработанной Барановым Д.С. [4] и дополненной Голли А.В. [5]) были определены основные причины некачественной работы датчиков и выхода их из строя:

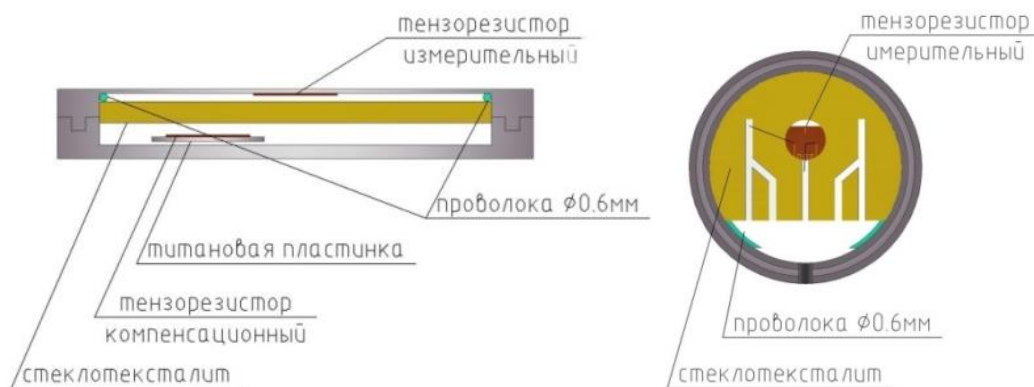
- обрыв ножки (контакта) тензодатчика;
- попадание воздуха и влаги в месте входа кабелей в датчик;
- обрыв самого сигнального кабеля;
- короткое замыкание тензодатчика на корпус мессдозы;
- отклеивание тензорезистора от корпуса датчика;
- брак при изготовлении корпуса мессдозы.

Для уменьшения количества брака были предложены следующие рекомендации:

- внедрение в корпус мессдозы платы из стеклотекстолита для жёсткой фиксации провода внутри (рисунок 3, рисунок 4);
- двухэтапная герметизация корпуса;
- использования цианакрилатного клея вместо клея БФ-2;
- переход на новый тип сигнальных кабелей КСПВ (ранее использовался кабель УТР).



*Рисунок 3. Общий вид модернизированной мессдозы (составлено автором)*



**Рисунок 4.** Схема модернизированной мессдозы (составлено автором)

Двухэтапная герметизация выполнялась с помощью эпоксидной смолы в два этапа. В первом этапе корпус мессдозы с подключённым кабелем прижимался к пластиковой форме для заливки струбциной (рисунок 5). Далее заливалась эпоксидная смола почти до верха корпуса датчика. Во втором этапе снималась струбцина до полного затвердевания первого слоя (для лучшей адгезии) и заливался второй слой эпоксидной смолы, который полностью скрывал датчик. Такая схема не допускает возможности попадания воздуха и влаги извне в корпус датчика. Мессдоза остается герметичной, а кабель жестко закрепленным.

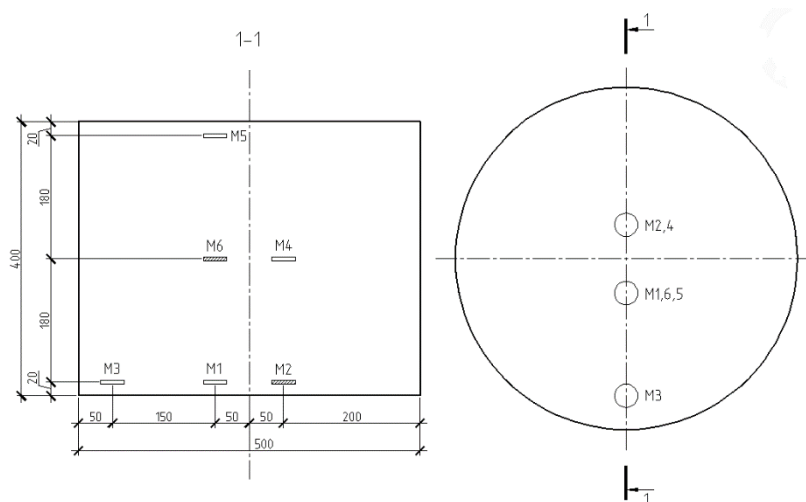
Ранее для наклейки тензодатчика на рабочую поверхность мессдозы использовался клей БФ-2 [6; 7], требующий температурной обработки в печи, что значительно усложняло процесс сборки датчика и увеличивало вероятность брака при изготовлении. Для упрощения наклейки тензодатчиков было предпринято использовать цианакрилатный клей (клей «супер Момент» ® универсальный секундный). На работу датчика изменения вида клея не повлияло, а вероятность отклеивания датчика сведена к нулю.



**Рисунок 5.** Первый этап герметизации мессдоз (составлено автором)

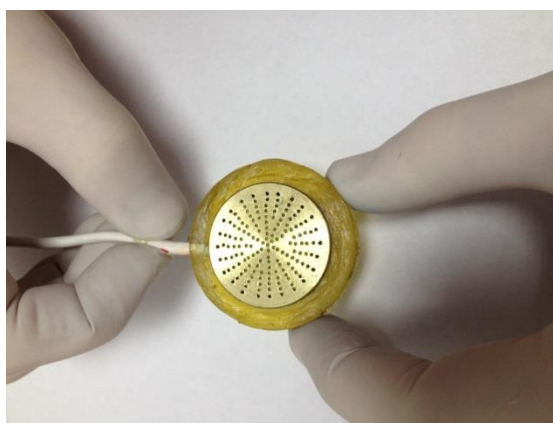
Модернизированные датчики были апробированы в ходе серии лабораторных экспериментов, проведенных на базе межкафедральной научной экспериментальной лаборатории Тюменского индустриального университета [8; 9].

В образец грунта были внедрены модернизированные датчики измерения общего давления мембранного типа (рисунок 6). Они применялись для проверки выполнения условий компрессионного сжатия и контроля нагружения образца. Датчики собраны на базе лаборатории, имеют круглую форму, корпус выполнен из титана. На рабочую поверхность датчика наклеен тензорезистор. При увеличении общего давления рабочая поверхность выгибается, за счет чего изменяется длина контактов тензорезистора и соответственно его сопротивление. Эти данные фиксируются регистрирующей аппаратурой (вторичный преобразователь ИТЦ-03п-40). Тарировка мессдоз проводилась в аэростатическом тарировочном баке [10].



**Рисунок 6.** Схема расстановки датчиков в образце М 1,3,4,5 – мессдозы общего давления, М 2,6 – мессдозы порового давления (составлено автором)

Также была принята попытка изготовления кустарных датчиков измерения поровых давлений в грунте. На корпус модернизированной мессдозы дополнительно помещалась перфорированная половина корпуса, в которую помещалась губка, смоченная глицерином (рисунок 7).



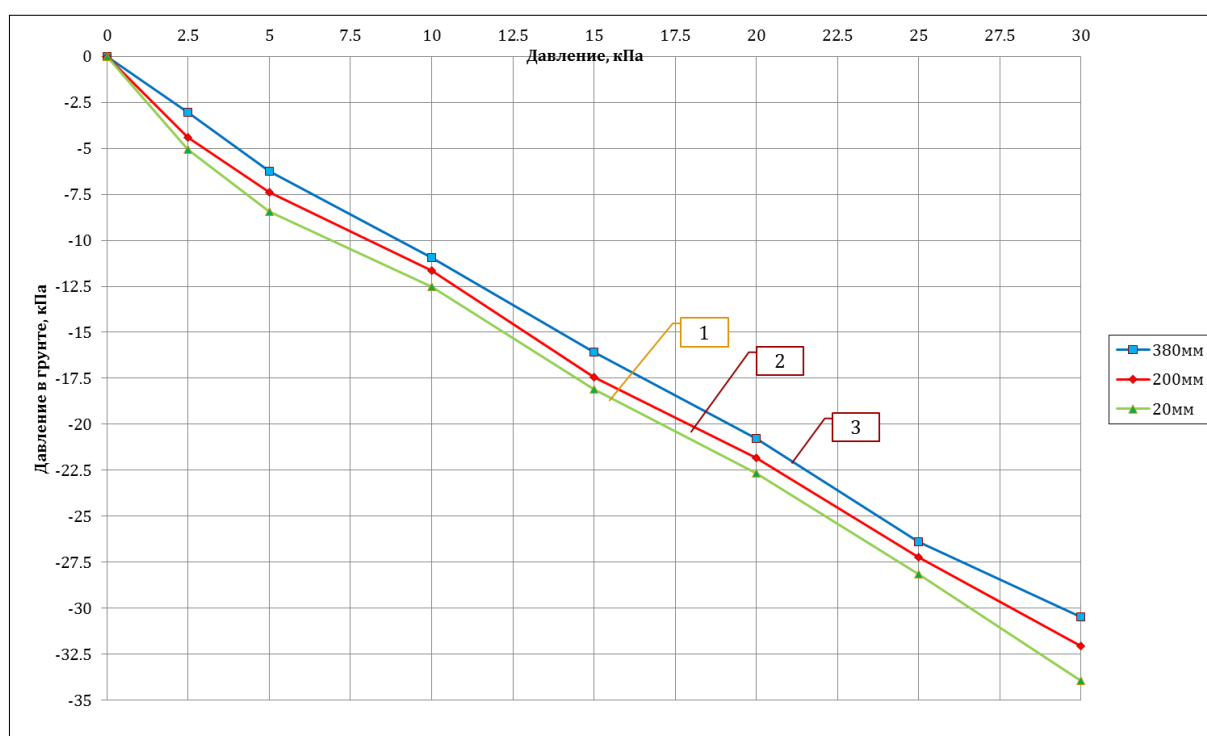
**Рисунок 7.** Прототип мессдозы для измерения поровых давлений в грунте (составлено автором)

В начале эксперимента датчик закономерно показывал изменения поровых давлений в грунте с характерным рассеиванием его после приложения нагрузки. Но с увеличением давление на образец через отверстия в датчике (это было констатировано по окончанию эксперимента) грунт попал на измерительную мембрану. Датчик стал показывать приращения давления, как датчик общего давления.

## Результаты

В ходе эксперимента на образец грунта прикладывалось давление через консольно-рычажную систему ступенями по методике лабораторного определения и характеристик прочности и деформируемости по ГОСТ<sup>2</sup>. Нагрузка дошла до 30 кПа (такой малый размер нагрузки связан с использованием в качестве образца органоминерального грунта, обладающего крайне малой несущей способностью). После этой ступени наступила условная стабилизация грунта.

Эксперимент продолжался 30 дней. За время эксперимента не один датчик общего давления не вышел из строя и отработал качественно. Погрешность измерений не превысила 10 %, что является хорошим показателем для кустарно изготовленных датчиков. По результатам эксперимента построен график зависимости давлений в грунте от давления на образец под штампом (рисунок 8).



**Рисунок 8.** График зависимости давлений в грунте от давления на образец под штампом (1 – датчик на глубине 20 мм; 2 – на глубине 200 мм; 3 – на глубине 380 мм) (составлено автором)

Датчики порового давления вышли из строя при нагрузке в 15 кПа. Это объясняется слишком большим диаметром отверстий рабочей поверхности. Вероятно, невозможно изготовление датчиков порового давления в кустарных условиях.

Модернизированная схема устраняет все недостатки «классической» схемы датчиков, выявленные в ходе массы экспериментов с их использованием. Становится не возможным обрыв ножки тензорезистора, т. к. она припаяна к жестко закрепленной плате. Отсутствует возможность короткого замыкания ножки тензорезистора на корпус датчика. За счет двухэтапной герметизации устраняется возможность попадания воздуха и влаги в корпус мессдозы. Обрыв самого кабеля предотвращается хорошей пайкой его не внутреннюю плату датчика.

<sup>2</sup> ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов А.В., Воронцов В.В. Исследование механических характеристик водонасыщенного торфа // Нефть и газ Западной Сибири: материалы Международной научно-технической конференции. Тюмень. 2017. С. 146–148.
2. Краев А.Н. Экспериментальные исследования работы слабого глинистого основания, усиленного песчаной армированной подушкой с криволинейной подошвой // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 5. С. 221–224.
3. Бай В.Ф., Краев А.Н. Исследование работы песчаной армированной по контуру подушки с криволинейной подошвой в условиях слабых глинистых грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 3 (44). С. 107–110.
4. Баранов Д.С. Руководство по применению прямого метода измерений давлений в сыпучих средах и грунтах. М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1965.
5. Голли А.В. Методика измерения напряжений и деформаций в грунтах: учебное пособие. Л.: ЛИСИ, 1984. 53 с.
6. Бай В.Ф., Воронцов В.В., Краев А.Н., Набоков А.В. Экспериментальные исследования и численное моделирование работы песчаной армированной сваи в водонасыщенном глинистом грунте // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 1. С. 67–71.
7. Бай В.Ф., Мальцева Т.В., Краев А.Н. Методика расчета слабого глинистого основания, усиленного песчаной армированной по контуру подушкой с криволинейной подошвой // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 5. С. 108–111.
8. Kulikov A.V., Vorontsov V.V. Determination of physical and mechanical characteristics of macro sample of water saturated peat // International Journal of Engineering Research in Africa. 2018. № 37, С. 103–111. DOI: 10.4028/www.scientific.net/JERA.37.103.
9. Твердохлеб С.А., Воронцов В.В. Результаты лабораторного исследования консолидации слабого водонасыщенного глинистого макрообразца удаленного от дневной поверхности // Актуальные проблемы архитектуры, строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири: сборник материалов международной научно-практической конференции. Т. I. Тюмень. 2015. С. 64–72.
10. Kulikov A.V., Bartolomey L.A., Vorontsov V.V. The water saturated peat mechanics properties research with taking into account excessive pore pressures // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. №. 19. С. 8395–8400.



**Kulikov Aleksandr Vladimirovich**

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia

E-mail: zeebr@mail.ru

## Measurement of stresses in soils with modernized sensors

**Abstract.** This article is devoted to the modernization of handicrafts manufactured to measure the stress in the ground (messdose). Today, when designing buildings and structures, an important task is to determine the amount of expected precipitation. The calculated values are not always objective, especially in the conditions of Western Siberia, where weak organic-mineral soils are common. Based on the experience of the introduction of sensors measuring the voltage in the ground, the author identified a number of factors by which they most likely fail. According to approximate calculations, until the end of the average natural experiment, about 25 % of the messdose remain operable. The author proposed options for upgrading sensors to minimize the risks of their failure. The main causes of sensor failure: contact breakdown, depressurization, short circuit. They are eliminated by inserting fiberglass boards and two-stage sealing into the sensor body. The body of the sensors was made of titanium. Cyanoacrylate glue was used for sticking the strain gauges onto the body of the messdose. Sealing was performed with epoxy resin. As a signal cable used 4-core cable KSPV. Calibration of the sensors was carried out in an aerostatic tank. Upgraded sensors were tested during a laboratory experiment. The author tested a sample of weak organic soil in compression conditions. No total pressure sensor has failed. The convergence of the sensor readings with the load applied to the sample is very high. The measurement error did not exceed 10 %. The author also attempted to make handicraft sensors to measure pore pressures in the ground, but during the implementation they all failed.

**Keywords:** messdose; compression; stress in the ground; strain gauge; organic soil; cyanoacrylate glue; fiberglass laminate; calibration

## REFERENCES

1. Kulikov A.V., Vorontsov V.V. (2017). Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik vodonasyshchennogo torfa. [*Study of the mechanical characteristics of water-saturated peat.*] Tyumen, pp. 146–148.
2. Kraev A.N. (2013). Experimental studies of the work of a weak clay base, reinforced with a sand reinforced pillow with a curvilinear sole. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*, 5, pp. 221–224 (in Russian).
3. Bai V.F., Kraev A.N. (2014). Study of the work of sandy reinforced along the contour cushion with a curved sole in conditions of weak clay soils. *Bulletin of civil engineers*, 3(44), pp. 107–110 (in Russian).
4. Baranov D.S. (1965). Rukovodstvo po primeneniyu pryamogo metoda izmereniy davleniy v sypuchikh sredakh i gruntakh. [*Guidance on the application of the direct method of measuring pressures in bulk media and soils.*] Moscow: Central Research Institute of Building Structures them. Kucherenko.
5. Golli A.V. (1984). Metodika izmereniya napryazheniy i deformatsiy v gruntakh: uchebnoe posobie. [*Methods of measuring stresses and deformations in soils: a training manual.*] Leningrad: Leningrad Institute of Civil Engineering, p. 53.
6. Bai V.F., Vorontsov V.V., Kraev A.N., Nabokov A.V. (2011). Experimental studies and numerical simulation of the work of reinforced sand piles in water-saturated clayey soil. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*, 1, pp. 67–71 (in Russian).
7. Bai V.F., Maltseva T.V., Kraev A.N. (2014). Method for calculating a weak clay base reinforced with a sandy curtain-reinforced cushion with a curved sole. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 5, pp. 108–111.
8. Kulikov A.V., Vorontsov V.V. (2018). Determination of physical and mechanical characteristics of macro sample of water saturated peat. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 37, pp. 103–111 (in Russian). DOI: 10.4028/www.scientific.net/JERA.37.103.
9. Tverdokhlebskiy S.A., Vorontsov V.V. (2015). Rezul'taty laboratornogo issledovaniya konsolidatsii slabogo vodonasyshchennogo glinistogo makroobraztza udalennogo ot dnevnoy poverkhnosti. [*Results of a laboratory study of the consolidation of a weak, water-saturated clay macro sample remote from the day surface.*] Tyumen, pp. 64–72.
10. Kulikov A.V., Bartolomey L.A., Vorontsov V.V. (2017). The water saturated peat mechanics properties research with taking into account excessive pore pressures. *International Journal of Applied Engineering Research*, 19(12), pp. 8395–8400.