

УДК: 528.482

DOI: 10.53816/23061456\_2022\_7-8\_45

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗБЫТОЧНОГО  
СТРУННОГО ДАТЧИКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА**

**SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS  
OF THE INFORMATION-REDUNDANT STRING CONVERTER  
OF THE INTELLIGENT MONITORING SYSTEM**

*Н.Н. Гусев, А.О. Кучеренко, В.О. Маслов*

*N.N. Gusev, A.O. Kucherenko, V.O. Maslov*

*ВКА им. А.Ф. Можайского*

Статья посвящена обоснованию основных параметров информационно-избыточных струнных датчиков. Сформулированы основные требования, предъявляемые к первичным струнным датчикам, предназначенным для работы в условиях воздействия на стартовые сооружения особых нагрузок. Даны рекомендации по подбору материала струны с учетом температурной нестабильности модуля упругости материала струны. Технические решения, описанные в статье, позволяют путем механического запоминания максимальных значений контролируемых параметров напряженно-деформированного состояния конструкций стартовых сооружений разнести во времени процессы фиксации этих параметров и их измерений. Тем самым оценивать эксплуатационную пригодность несущих конструкций стартовых сооружений после воздействия особых нагрузок, даже в условиях аварийного отключения питания вторичной аппаратуры.

**Ключевые слова:** системы контроля технического состояния, мониторинг, специальное сооружение, первичный струнный преобразователь, информационно-избыточный датчик, особые нагрузки, напряженно-деформированное состояние, вторичная аппаратура.

The article is devoted to the substantiation of the main parameters of information-redundant string converter. The basic requirements for primary string converter designed to operate under conditions of exposure to special loads on launch facilities are formulated. Recommendations are given on the selection of the string material, taking into account the temperature instability of the elastic modulus of the string material. The technical solutions described in the article make it possible, by mechanically memorizing the maximum values of the controlled parameters of the stress-strain state of the structures of launch facilities, to spread the processes of fixing these parameters and their measurements over time. Thus, to assess the operational suitability of the load-bearing structures of the launch facilities after exposure to special loads, even in conditions of emergency power outage of secondary equipment.

**Keywords:** technical condition monitoring systems, monitoring, special structure, primary string converter, information-redundant sensor, special loads, stress-strain state, secondary equipment.

При классификации нагрузок, действующих на стартовое сооружение (СС), выделяют постоянные (собственный вес строительных конструкций) и временные (длительные, кратковременные и особые). В целях контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) СС начиная с 60-х годов прошлого века на них создавались системы испытаний и долговременного контроля (ИДК). Эти системы ориентировались на оценку НДС несущих конструкций СС при воздействии на них постоянных, длительных и частично кратковременных нагрузок. Опыт эксплуатации СС показал, что наряду со штатными режимами эксплуатации СС имеют место и не штатные, сопровождаемые воздействием на них особыми нагрузками, которые не учитывались при создании систем ИДК. Системы ИДК как в целом, так и их отдельные комплекты, в том числе тензометрические комплекты, при особом нагружении утрачивают свою работоспособность. Причина кроется в том, что при особом нагружении возможно сочетание следующих критических ситуаций: отключение электропитания системы, нарушение целостности кабельной сети между элементами системы или резкое изменение ее параметров, например из-за резкого изменения температуры [1]. Кроме того, тензометрические комплекты (ТК) систем ИДК на основе струнных преобразователей (СП) обладают еще двумя существенными недостатками: отсутствие возможности проведения проверок первичных преобразователей и регистрации наиболее значимых составляющих НДС конструкций — их максимальных значений в момент воздействия особыми нагрузками [2]. Для устранения указанных недостатков требуется создание технических средств контроля НДС СС на базе интеллектуальных систем. Основой таких систем должны стать информационно-избыточные струнные датчики (ИИСД), лишенные недостатков, присущих существующим первичным СП ТК систем ИДК.

В данной статье рассматриваются подходы и принципы конструирования таких первичных струнных преобразователей ТК систем ИДК СС.

### Требования, предъявляемые к информационно-избыточным струнным датчикам

Основные требования, предъявляемые к первичным ИИСД, предназначенным для рабо-

ты в условиях воздействия на СС особыми нагрузками, сводятся к следующим:

- 1) возможность регистрации максимальных значений параметров НДС, возникающих в момент воздействия на СС особыми нагрузками, даже в условиях отключения электропитания;
- 2) возможность проверок после установки в тело строительных конструкций;
- 3) возможность контроля температуры в точке установки первичного преобразователя;
- 4) возможность использования различных типов вторичной аппаратуры для их возбуждения;
- 5) унификация параметров выходных сигналов первичных преобразователей.

В качестве первичных ИИСД выбраны частотные СП. Основными аргументами в пользу такого выбора являются следующие:

- долговечность (до настоящего времени не утратили свою работоспособность СП, установленные в тело бетонной плотины Днепрогэс, и железобетонные конструкции СС космодрома Байконур [3]);
- огромный опыт эксплуатации таких преобразователей в гидротехнике, атомной энергетике и на объектах наземной космической инфраструктуры;
- высокая точность и чувствительность.

### Выбор материала струны

Частота колебания струны описывается выражением [4]:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho S}}, \quad (1)$$

где  $f$  — частота колебания струны (Гц);

$l$  — длина струны (м);

$F$  — сила натяжения струны (Н);

$\rho$  — плотность материала струны (кг/м<sup>3</sup>);

$S$  — площадь поперечного сечения струны (м<sup>2</sup>).

При выборе материала струны принимались во внимание следующие требования: высокая прочность при вибрационных нагрузках, определенное значение температурного коэффициента линейного расширения [4] (что обусловлено возможностью резкого изменения

температуры в процессе воздействия особых нагрузок), стабильность и температурная независимость упругих свойств, незначительность упругого последействия, возможность получения максимальной чувствительности. В наибольшей степени этим требованиям отвечают сталь углеродистая качественная 65 по ГОСТ 1050-2013 и сплав К40НХМВ. В серийно выпускаемых СП, используемых в ТК систем ИДК, для изготовления струн используется углеродистая сталь.

Углеродистая качественная сталь 65 по ГОСТ 1050-2013 имеет следующие основные характеристики:

1. Допустимое напряжение в материале струны,  $\sigma_{\text{доп}}$ , Н/мм<sup>2</sup> — 350;
2. Модуль нормальной упругости,  $E$ , Н/мм<sup>2</sup> —  $21 \cdot 10^4$ ;
3. Плотность материала струны,  $\rho$ , кг/мм<sup>3</sup> —  $7,8 \cdot 10^{-6}$ ;
4. Температурный коэффициент линейного расширения,  $\alpha_t$ , 1/град —  $11,8 \cdot 10^{-6}$ .

Сплав К40НХМВ превосходит углеродистую качественную сталь 65 по ГОСТ 1050-2013 по некоторым показателям:

1. Допустимое напряжение в материале струны,  $\sigma_{\text{доп}}$ , Н/мм<sup>2</sup> — 1000;
2. Модуль нормальной упругости,  $E$ , Н/мм<sup>2</sup> —  $21 \cdot 10^4$ ;
3. Плотность материала струны,  $\rho$ , кг/мм<sup>3</sup> —  $8,8 \cdot 10^{-6}$ ;
4. Температурный коэффициент линейного расширения,  $\alpha_t$ , 1/град —  $0,5 \cdot 10^{-6}$ .

Однако этот факт не является определяющим при выборе материала струны.

Для обеспечения выполнения требований по возможности использования различных типов вторичной аппаратуры для их возбуждения, и унификации параметров выходных сигналов первичных преобразователей геометрические размеры струны должны быть такими, чтобы при допустимых напряжениях в струне, ее частота лежала бы в пределах: 800–2222 Гц (из условия унификации выходных сигналов СП) или 500–2500 Гц (из условия возможности использования различных типов вторичной аппаратуры для их возбуждения). Если учесть, что из условия ограничения роста температурной нестабильности модуля упругости струны, рекомендуется выбирать [4] соотношение  $\sigma/E$  не более

$0,5 \cdot 10^{-3}$ , то напряжения в струне не должны превышать 105 Н/мм<sup>2</sup>. С другой стороны, из условия устойчивости колебания струны напряжение в струне должно быть не ниже 50 Н/мм<sup>2</sup>.

### Подбор параметров струны

При диаметре струны  $d = 0,2$  мм для достижения показателя  $\sigma = 50 \div 105$  Н/мм<sup>2</sup>, сила натяжения струны  $F$  должна быть в пределах от 9,81 до 20,61 Н.

Используя известное выражение (1) для частоты колебания струны получаем, что при длине струны от 0,05 до 0,07 м, частота колебания струны при  $\sigma = 50$  Н/мм<sup>2</sup> будет лежать в пределах от 783,68 до 538,34 Гц, а при  $\sigma = 105$  Н/мм<sup>2</sup> — в пределах от 1092,43 до 780,31 Гц — для сплава К40НХМВ, при той же длине струны, частота колебания струны при  $\sigma = 50$  Н/мм<sup>2</sup> будет лежать в пределах от 800,95 до 572,10 Гц, а при  $\sigma = 105$  Н/мм<sup>2</sup> — в пределах от 1160,34 до 822,82 Гц для стали 65 по ГОСТ 1050-2013. Полученные характеристики сопоставимы.

Теоретические графики зависимости  $f(l)$  при различных значениях  $F$  для струны из сплава К40НХМВ представлены на рис. 1.

Теоретические графики зависимости  $f(l)$  при различных значениях  $F$  для струны из стали 65 по ГОСТ 1050-2013 представлены на рис. 2.

Однако сплав К40НХМВ является неферромагнитным, и не применим для электромагнитного способа возбуждения колебаний струны, применяемого в ТК систем ИДК. Наличие в корпусе ИИСД электромагнитных катушек возбуждения (ЭКВ), кроме основной функции — возбуждения колебания, позволяет контролировать температуру в точке расположения ИИСД по сопротивлению обмоток ЭКВ, что позволяет компенсировать температурную погрешность ИИСД.

Окончательный выбор параметров струны сделан исходя из противоречивых требований к чувствительности, линейности и стабильности струнного преобразователя, а именно:  $l = 50,0 \div 70,0$  мм;  $d = 0,2$  мм;  $F = 21,0$  Н. Соотношение  $l/d = 250 \div 350$ , что укладывается в рекомендуемые пределы от 250 до 500. При таких параметрах струны из стали 65 по ГОСТ 1050-2013 частота ее колебаний изменяется от 1171,27 до

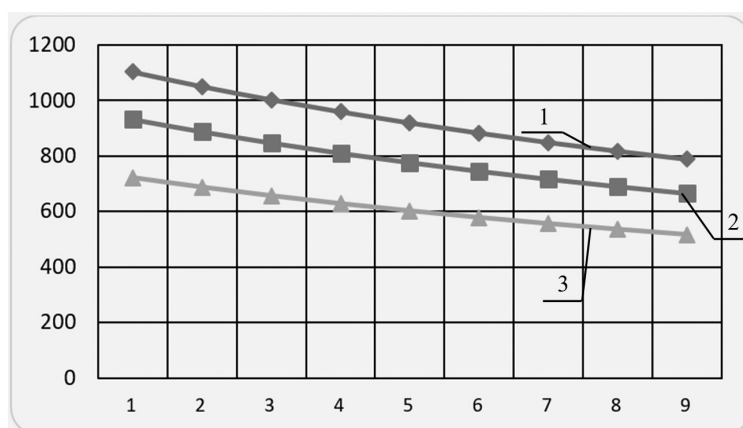


Рис. 1. Теоретические графики зависимости  $f(l)$  в диапазоне изменения  $l$  от 0,05 до 0,07 м при различных значениях силы натяжения  $F$ : 1 — 21,0 Н; 2 — 15,0 Н; 3 — 9,0 Н для струны из сплава К40НХМВ

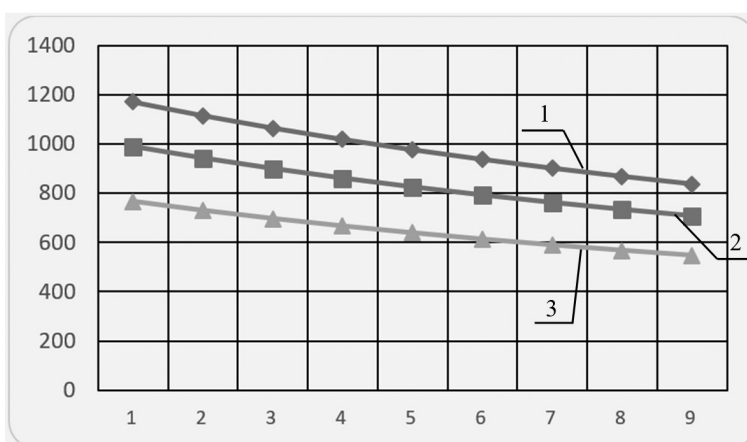


Рис. 2. Теоретические графики зависимости  $f(l)$  в диапазоне изменения  $l$  от 0,05 до 0,07 м при различных значениях силы натяжения  $F$ : 1 — 21,0 Н; 2 — 15,0 Н; 3 — 9,0 Н для струны из стали 65 по ГОСТ 1050-2013

836,62 Гц, что укладывается в рабочий диапазон серийно выпускаемой вторичной аппаратуры (500–2500 Гц).

### Выбор способа крепления струны

В СП ТК систем ИДК применяется способ крепления струн с помощью пайки низкотемпературными припоями (температура плавления от 145 до 450 °С). Ввиду того, что при особых воздействиях на СС возможно резкое повышение температуры, способ крепления с помощью пайки для проектируемого СП не применим.

Для крепления струны предложено использовать крепление с помощью обжатия с зачеканкой в круглом ниппеле [5].

Выбор в качестве материала струны ферромагнитной стали 65 по ГОСТ 1050-2013 предо-

пределил выбор способа возбуждения колебаний струны — электромагнитный с помощью электромагнитной катушки возбуждения. В целях обеспечения совместимости ИИСД с вторичной аппаратурой ТК систем ИДК и серийно выпускаемой вторичной аппаратурой [5] предложено использовать в качестве возбудителя колебаний обратимые электромагнитные преобразователи серийно выпускаемых СП — электромагнитные катушки возбуждения с выходным импедансом, измеренным на частоте 1500 Гц,  $(0,25 \pm 0,05)$  кОм.

### Выбор материала корпуса ИИСД

Известно, что с изменением температуры окружающей среды происходит изменение линейных размеров корпуса ИИСД и его струны,

а также изменение модуля упругости материалов, из которых они изготовлены. Это в свою очередь приводит к температурной погрешности измерения физической величины  $P$ . Выражение для оценки относительной погрешности определения частоты  $f$ , обусловленной изменением температуры окружающей среды, имеет вид [2]:

$$\delta_i^0 = (\alpha_c - \alpha_s) l \frac{\Delta t^\circ}{2} \Delta l_0,$$

где  $\alpha_c$ ,  $\alpha_s$  — температурные коэффициенты удлинения корпуса и струны;

$\Delta l_0$  — максимальное рабочее удлинение струны, вызванное измеряемой физической величиной  $P$ ;

$\Delta t^\circ$  — приращение температуры;

$l$  — длина струны.

Следовательно, относительная погрешность определения частоты  $f$  зависит от разности  $(\alpha_c - \alpha_s)$  температурных коэффициентов удлинения корпуса и струны ИИСД, которые сами зависят от температуры. Применяемая в серийно выпускаемых СП сталь для струн — сталь 45Г2 имеет значение коэффициента  $\alpha_s$ , которое в диапазоне рабочих температур ИИСД меняется в пределах 1,7 %, а для материала корпуса  $\alpha_c$  (сталь марки 40Х13) в диапазоне рабочих температур в пределах 2,7 %. При этом происходит температурное удлинение струны на величину, соизмеримую с диапазоном измерения физической величины  $P$  [2].

В целях минимизации температурной погрешности принято решение применить для корпуса ИД сталь с коэффициентом линейного расширения, равным коэффициенту линейного расширения материала струны — это сталь 40Х по ГОСТ 2590-2006 ( $\alpha_i = 11,8 \cdot 10^{-6}$  /град).

### Обоснование диапазона измерения деформации (перемещения)

В целях обеспечения возможности использования различных типов вторичной аппаратуры для возбуждения струны ИИСД его диапазон изменения участков струны ИИСД ( $\Delta l$ ) в процессе измерения не должен превышать величину 20 мм (рис. 2), что вытекает из требований по обеспечению напряжений в струне в диапазоне  $\sigma = 50 \div 105$  Н/мм<sup>2</sup>. Диапазон изменения участ-

ков струны ИИСД ( $\Delta l$ ) в процессе измерения может быть расширен или сужен путем использования мультипликаторов различных типов.

Возможность регистрации максимальных значений параметров НДС, возникающих в момент воздействия на СС особых нагрузок, даже в условиях отключения электропитания, а также возможность проверок после установки ИИСД в тело строительных конструкций обеспечивается конструктивными особенностями ИИСД (рис. 3).

Поставленная задача достигается тем, что струна датчика разделена на три участка: первый ( $l_1$ ) обеспечивает измерение текущего значения измеряемой величины; второй имеет постоянную длину ( $l_2$ ), что обеспечивает возможность проверки датчика без извлечения его из тела строительной конструкции; третий ( $l_3$ ) обеспечивает измерение максимального значения измеряемой величины за весь период эксплуатации датчика. Первый участок струны в процессе измерения может изменяться на величину  $\Delta l \leq 20$  мм, второй — на величину  $\Delta l \leq 10$  мм. Изменение длин этих участков происходит за счет перемещения двух подвижных элементов. Первый подвижный элемент изменяет участок струны на величину значения текущей деформации (перемещения) конструкции  $\Delta l_{\text{тек}}$ , а второй на величину деформации (перемещения) конструкции  $\Delta l_{\text{макс}}$  за весь период эксплуатации датчика. Благодаря наличию храпового механизма максимальное значение деформации (перемещения) конструкции  $\Delta l_{\text{макс}}$  за весь период эксплуатации датчика постоянно зафиксировано и не зависит от того, подано питание на вторичную аппаратуру или нет.

Новизна технических решений, примененных при создании данного интеллектуального датчика, подтверждена патентом 2685803 РФ [6].

### Выводы

Определяющими параметрами при оценивании эксплуатационной пригодности несущих конструкций СС после воздействия особых нагрузок являются значения параметров НДС, вызванных непосредственно в момент их воздействия [7, 8]. Основным недостатком СП систем ИДК является то, что регистрация измеряемых параметров возможна только при включенной вторичной аппаратуре. В условиях выключения

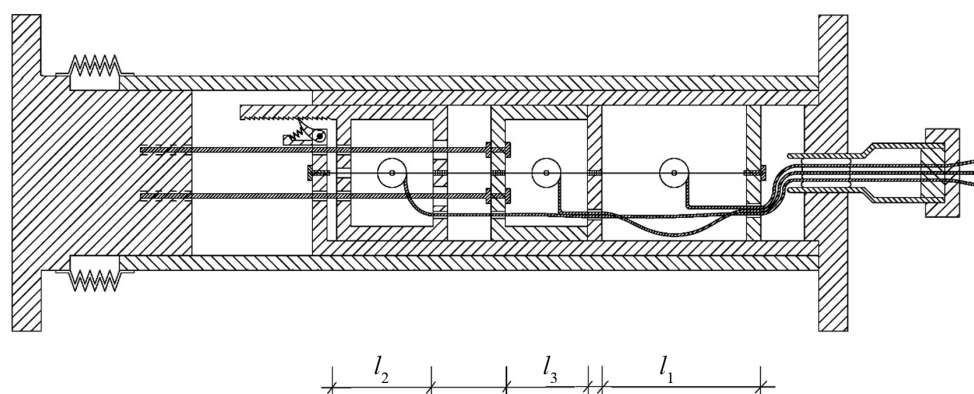


Рис. 3. Конструкция ИИСД

или повреждения вторичной аппаратуры получение информации от датчика прекращается [9–11]. Вместе с тем значения параметров НДС, формирующихся непосредственно в момент воздействия особых нагрузок, могут превышать их предельные допустимые значения.

Предложенные авторами технические решения позволяют путем механического запоминания максимальных значений контролируемых параметров НДС разнести во времени процесса фиксации этих параметров и их измерений.

Метод на основе предложенных интеллектуальных датчиков позволяет оценивать техническое состояние СС даже в условиях, если вторичная аппаратура ТК системы ИДК в момент аварии будет обесточена.

В статье обоснованы основные параметры предложенного интеллектуального датчика, даны рекомендации по подбору материалов струны и элементов его корпуса, обоснованы диапазоны измерения и пути их расширения.

### Литература

1. Гусев Н.Н., Кучеренко А.О. Работоспособность систем мониторинга специальных сооружений при изменении параметров кабельной сети // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 7–8 (133–134). — СПб.: НТЦ «Информтехника». 2019. С. 142–149.

2. Gusev N.N., Kucherenko A.O., Svatovskaya L.B. The method of estimation of the technical conditions of transport facilities used in cold regions after the accidents caused by temperature anomalies. Lecture Notes in Civil Engineering.

Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Vol. 2. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Springer Singapore. P. 309–318.

3. Гусев Н.Н., Кучеренко А.О. Адаптация систем испытаний и долговременного контроля к условиям аварийных ситуаций на стартовых сооружениях наземной космической инфраструктуры // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2018. Вып. 663. С. 71–75.

4. Эткин Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика. — М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 408 с.

5. СТО 70238424.27.140.004-2008 Контрольно-измерительные системы и аппаратура гидротехнических сооружений ГЭС. Условия создания. Нормы и требования. — М.: ОАО РАО «ЕЭС России», 2019. 58 с.

6. Датчик перемещения: пат. 2685803 РФ: МПК G01L 1/10 (2006/01) / Гусев Н.Н., Кучеренко А.О.; заявители и патентообладатели Гусев Н.Н., Кучеренко А.О. № 2017144153/28; заявл. 15.12.2017; опубл. 23.04.2019, Бюл. № 12. 3 с.

7. Попов В.А., Гула Д.Н. К вопросу определения расчетных характеристик равнодействующих сил полей пульсаций газодинамических давлений, воздействующих на конструкции стартовых сооружений // Фундаментальные исследования. 2016. № 9 (часть 3). С. 506–510.

8. Gusev N.N., Kucherenko A.O., Svatovskaya L.B. Effect of changing of the parameters of the cable network of monitoring systems of high-rise buildings on the basis of string converters on their oper-ability. Megacities and tall buildings, E3S Web of Conferences 33. 2018. P. 1–8.

9. Гусев Н.Н., Кучеренко А.О. Особенности оценки технического состояния несущих кон-

струкций специальных сооружений при особых нагрузках и воздействиях / Специальные сооружения и объекты: актуальные проблемы изысканий, строительства и эксплуатации // Сборник научных трудов участников межвузовской научно-практической конференции (25 апреля 2019 г.). ВИ (ИТ) ВА МТО им. А.В. Хрулёва. — СПб.: ВИ(ИТ) ВА МТО, 2019. С. 152–156.

10. РД 153.34.2-21.546-2003 Правила организации и проведения натурных наблюдений и исследований на плотинах из грунтовых материалов. — СПб.: ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2004. 67 с.

11. Гусев Н.Н. Метод и средства восстановления работоспособности систем мониторинга безопасности зданий и сооружений опасных производственных объектов и гидротехнических сооружений при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций / XXI век: Человек. Общество. Наука // Сборник научных статей. — СПб.: Военная академия связи. СЗФ ВНИИ МВД России. 2007. С. 31–34.

### References

1. Gusev N.N., Kucherenko A.O. Operability of monitoring systems of special constructions at change of parameters of a cable network // *Voprosy obronnoi tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeystviia terrorizmu*. 2019. № 7–8 (133–134). — Saint-Petersburg: Scientific and technical center «Informtekhnik». P. 142–149.

2. Gusev N.N., Kucherenko A.O., Svatovskaya L.B. The method of estimation of the technical conditions of transport facilities used in cold regions after the accidents caused by temperature anomalies. *Lecture Notes in Civil Engineering. Transportation Soil Engineering in Cold Regions*. Vol. 2. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Springer Singapore. P. 309–318.

3. Gusev N.N., Kucherenko A.O. Adaptation of testing and long-term monitoring systems to emergency conditions at launch facilities of ground-based space infrastructure // *Proceedings of the MSA named after A.F. Mozhaysky*. Issue 663. — Saint-Petersburg: MSA named after A.F. Mozhaysky, 2018. P. 71–75.

4. Etkin L.G. *Vibrochastotnye sensors. Theory and practice*. — Moscow: Publishing house of MSTU named after N.Eh. Bauman, 2004. 408 p.

5. Standard of organization STO 17330282.27.140.021-2008 Control and measuring systems and equipment of hydraulic structures of hydroelectric powerplants. Organization of operation and maintenance. Norms and requirements. — Moscow: UES of Russia RAO OAO, 2019. 58 p.

6. Motion sensor: patent 2685803 Russia: MPK G01L 1/10 (2006/01) / Gusev N.N., Kucherenko A.O.; applicants and patentees Gusev N.N., Kucherenko A.O. № 2017144153/28; announced 15.12.2017; posted on 23.04.2019. *Bulletin № 12*. 3 p.

7. Popov V.A., Gula D.N. On the issue of determining the design characteristics of the resultant forces of the fields of pulsations of gas-dynamic pressures affecting the structures of launch facilities // *Fundamental research*. 2016. № 9 (volume 3). P. 506–510.

8. Gusev N.N., Kucherenko A.O., Svatovskaya L.B. Effect of changing of the parameters of the cable network of monitoring systems of high-rise buildings on the basis of string converters on their operability. *Megacities and tall buildings, E3S Web of Conferences 33*. 2018. Pp. 1–8.

9. Gusev N.N., Kucherenko A.O. Features of assessing the technical condition of load-bearing structures of special structures under special loads and impacts / *Special structures and facilities: current problems of research, construction and operation*. Collection of scientific papers of participants of the interuniversity scientific and practical conference (April 25, 2019). MI(ET) MA of MTS named after general of the army A.V. Khrulev. — Saint-Petersburg: MI(ET) MA of MTS. 2019. P. 152–156.

10. RD 153-34.2-21.546-2003 Rules for the organization and conduct of field observations and studies on dams from ground materials. — Saint-Petersburg: JSC «VNIIG named after B.E. Vedeneyeva», 2004. 67 p.

11. Gusev N.N. Method and means of restoration of operability of monitoring systems of safety of buildings and constructions of hazardous production facilities and hydraulic engineering structures at liquidation of consequences of emergency situations / XXI century: Man. Society. Science // *Collection of scientific articles*. — Saint-Petersburg: Military Academy of communications. NWB RRI MIA of Russia. 2007. P. 31–34.