

УДК 355.7

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-81-95](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-81-95)

Теоретические и экспериментальные исследования

Методика расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений в нескальных грунтах на воздействие сейсмовзрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций

Короленок Л.М.¹, Снегирев А.Е.², Сорокин Н.В.²

¹Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева.

Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Центр Государственной Экспертизы Федеральной службы войск национальной гвардии РФ. Москва, Российская Федерация

Аннотация: Статья посвящена вопросу разработки научно-методического аппарата, позволяющего при реконструкции произвести поверочные расчеты котлованного специального фортификационного сооружения в нескальных грунтах на воздействие сейсмовзрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций. В частности, в данной статье авторами предложена и освещена методика расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений в нескальных грунтах на воздействие сейсмовзрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций. Теоретическая значимость описанной методики заключается в обосновании применения теорий механики континуума, упругости и пластичности и методов конечных элементов и начальных напряжений при расчете несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений на воздействие сейсмовзрывных волн ядерного взрыва в процессе проектирования реконструкции КСФС. Практическая значимость разработанной авторами методики заключается в возможности применения для оценки фактического состояния несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений после воздействия динамических нагрузок.

Ключевые слова: котлованные специальные фортификационные сооружения (КСФС), сейсмовзрывные волны ядерного взрыва, реконструкция, модель расчета

Для цитирования: Короленок Л.М., Снегирев А.Е., Сорокин Н.В. Методика расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений в нескальных грунтах на воздействие сейсмовзрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. №4. С.81-95. DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-81-95](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-81-95)

Вклад авторов:

Короленок Л.М. – общее руководство работой, редактирование чернового варианта статьи. Снегирев А.В., Сорокин Н.В. – анализ экспериментальных данных, подготовка черновой версии статьи, ее окончательная редакция.

@ Л.М. Короленок, А.Е. Снегирев, Н.В. Сорокин, 2022

Финансирование:

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Method of calculation of reconstructed excavation special fortifications in non-rock soils on the impact of seismic waves of a nuclear explosion, taking into account the actual state of the load-bearing structures

Leonid M. Korolenok¹, Alexey E. Snegirev², Nikita V. Sorokin²

¹Military Institute (Engineering and Technical) Military Academy of Material and Technical Support named after Army General A.V. Khrulev. Saint Petersburg, Russian Federation

²Center for State Expertise of the Federal Service of the National Guard Troops of the Russian Federation. Moscow, Russian Federation

Abstract: The article is devoted to the development of a scientific and methodological apparatus that allows during reconstruction to make verification calculations of a special fortification in non-rock soils for the impact of seismic waves of a nuclear explosion, taking into account the actual state of the load-bearing structures. In particular, in this article, the authors proposed and consecrated a method for calculating reconstructed excavation special fortifications in non-rock soils on the impact of seismic waves of a nuclear explosion, taking into account the actual state of the load-bearing structures. The theoretical significance of the described technique is to substantiate the application of the theories of continuum mechanics, elasticity and plasticity, and methods of finite elements and initial stresses in the calculation of load-bearing structures of special excavation fortifications to the effects of seismic waves of a nuclear explosion during the design of the reconstruction of the KSFS. The practical significance of the methodology developed by the authors lies in the possibility of application to assess the actual condition of the bearing structures of the excavated special fortifications after exposure to dynamic loads.

Keywords: excavated special fortification structures (CSFS), seismic explosive waves of a nuclear explosion, reconstruction, calculation model

For citation: Leonid M. Korolenok, Alexey E. Snegirev, Nikita V. Sorokin. Method of calculation of reconstructed excavation special fortifications in non-rock soils on the impact of seismic waves of a nuclear explosion, taking into account the actual state of the load-bearing structures. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 4, pp. 81-95

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-81-95](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-81-95)

Contribution of the authors:

Leonid M. Korolenok – general management of the work, editing of the draft version of the article. Alexey E. Snegirev, Nikita V. Sorokin – analysis of experimental data, preparation of a draft version of the article, its final revision.

Funding:

The study had no sponsorship.

Conflict of interest:

The authors declare that there is no conflict of interest.

1. Введение

подавляющее большинство специальных фортификационных сооружений котлованного типа, возведенных в порядке заблаговременной военно-инженерной подготовки территории страны к военным действиям, было построено в советское время в период с 1950 по 1970 годы. Внедрение активной системы защиты (ПРО) позволило сделать КСФС основной сдерживающей силой при первых наступательных действиях противника.

В условиях ограниченного финансирования строительства в Министерстве обороны Российской Федерации и для ускорения сроков постановки на боевое дежурство котлованных специальных фортификационных сооружений необходимо пойти по пути реконструкции или капитального ремонта существующих КСФС.

Однако, в современных условиях оценка степени защиты котлованных специальных фортификационных сооружений при реконструкции в Министерстве обороны Российской Федерации характеризуется наличием ряда противоречий.

Во-первых, практика эксплуатации котлованных фортификационных сооружений в сейсмически активных районах показала, что КСФС получают повреждения, снижающие их защитные свойства, однако в нормах проектирования природная сейсмика как расчетное воздействие отсутствует.

Во-вторых, дефекты и повреждения, получаемые КСФС в процессе эксплуатации, снижают защитные свойства данных сооружений, при этом отсутствуют методики по оценке степени защиты КСФС с учетом фактического состояния несущих конструкций при реконструкции.

Вышеперечисленные противоречия могут быть решены разработкой научно-методического аппарата, позволяющего при реконструкции произвести поверочные расчеты котлованного специального фортификационного сооружения в нескальных грунтах на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций на основе теорий механики континуума, упругости и пластичности и методов конечных элементов и начальных напряжений.

В процессе разработки вышеуказанного научно-методического аппарата авторами была предложена методика расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений в нескальных грунтах на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций, ключевые аспекты которой изложены в данной статье.

2. Основные положения методики

Методика предназначена для учета фактического состояния несущих конструкций при проектировании реконструкции котлованных специальных фортификационных сооружений, рассчитываемых на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва.

Сущность методики состоит в том, что после проведения визуального и детального обследования выполняется поверочный расчет, целью которого является определение фактического состояния несущих конструкций за всю историю эксплуатации котлованного специального фортификационного сооружения, при этом учитываются и дефекты, выявленные на предыдущем этапе обследования. Общая схема алгоритма расчета представлена на рисунке (рис. 1).

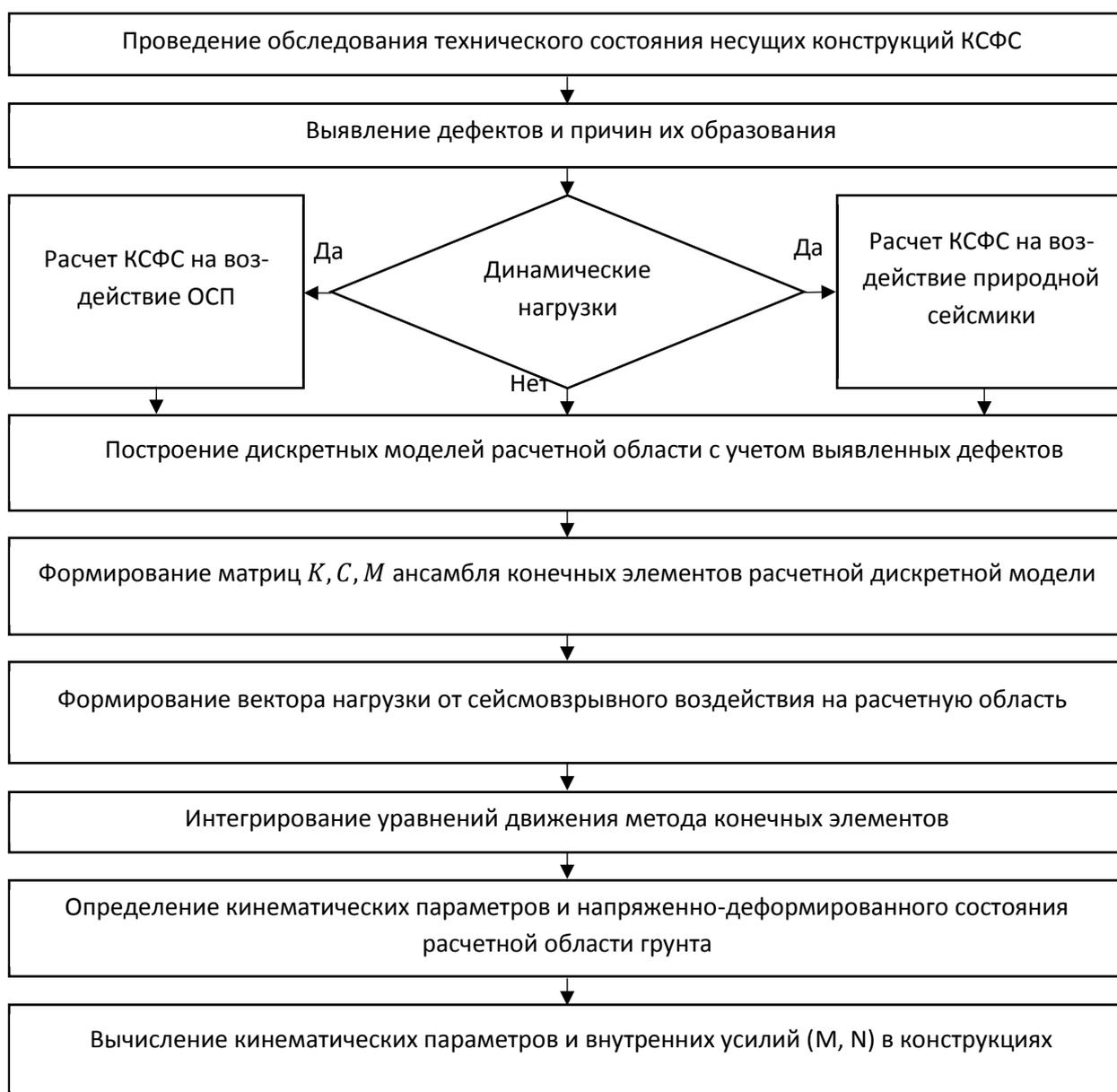


Рисунок 1 – Общая блок-схема алгоритма расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений

Figure 1 – General block diagram of the algorithm for calculating reconstructed excavation special fortifications

Оценка фактического технического состояния несущих конструкций КСФС, в том числе защищенности и живучести КСФС в целом или его отдельных элементов для принятия решения по реконструкции производится на основе результатов обследования сооружения.

Обследование технического состояния КСФС проводится в два этапа. На 1 этапе выполняют визуальное обследование несущих конструкций для выявления значительных и критических дефектов, влияющих на несущую способность, жесткость и устойчивость. На 2 этапе проводят детальное обследование поврежденных несущих конструкций обде-

лок в соответствии с нормативными документами [1, 2]. По данным обследования выявляют участки с дефектами.

Целью визуального обследования является первичная (оперативная) оценка технического состояния КСФС за все время эксплуатации. Результатами проведения предварительного (визуального) обследования являются: схемы и ведомости дефектов и повреждений с фиксацией их мест и характера; результаты проверки наличия характерных деформаций сооружения и его отдельных строительных конструкций (прогибы, крены, выгибы, перекосы, разломы и т. п.); выявление аварийных участков (при наличии).

Если результатов визуального обследования для принятия решения по реконструкции недостаточно, и при визуальном обследовании обнаружены дефекты и повреждения, снижающие прочность и устойчивость несущих конструкций сооружения, то переходят к инструментальному обследованию.

На основе результатов инструментального обследования устанавливаются цели, задачи, виды и характер повреждений несущих конструкций необходимые для принятия решения о дальнейшей реконструкции КСФС.

В ходе проведения обследования дается оценка технического состояния железобетонных несущих конструкций на основе:

- определения геометрических размеров конструкций и их сечений;
- сопоставления фактических размеров конструкций с проектными размерами; физико-механических свойств материалов конструкций;
- наличия трещин, сколов и разрушений; месторасположения;
- характера трещин и ширины их раскрытия, состояния защитных покрытий, деформаций конструкций;
- признаков нарушения сцепления арматуры с бетоном, наличия разрывов арматуры, степени коррозии бетона и арматуры.

С целью уточнения результатов обследования проводится поверочный расчет несущих конструкций КСФС на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва. Расчет выполняется в специализированном программном комплексе на базе метода конечных элементов в форме перемещений, предусматривающий следующие этапы расчета [4]:

- разбиение рассматриваемой области на конечные элементы, и подготовка топологической, геометрической и физической информации;
- построение для выделенных конечных элементов на основе информации зависимых переменных кусочно-полиномиальными функциями с известными параметрами для каждого конечного элемента, соответствующих матриц (жесткости, масс, вязкости) и векторов, определяющих зависимости между реакциями и перемещениями в узлах элементов;
- формирование разрешающей системы уравнений, дающих значение полей перемещений, скоростей и ускорений узловых точек.

Для полноценной картины напряженно-деформирования состояния расчет выполняется в пространственной постановке с применением нелинейных моделей работы нескального грунта и материала несущих конструкций.

Для выполнения пространственного расчета котлованных специальных фортификационных сооружений на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва выбирается область, включающая нескальный грунт, вмещающий котлованное специальное фортификационное сооружение [4]. Формирование дискретной модели расчетной области подразумевает разбиение грунтового массива на гексаэдральные конечные элементы с восемью узлами, а конструкции КСФС разбиваются на оболочечные конечные элементы с четырьмя узлами. При этом густота элементов увеличивается в зоне ограждающих конструкций и уменьшается по мере удаления от сооружения к границам области. Изменение размеров элементов от слоя к слою должно быть плавным, чтобы исключить эффекты от-

ражения при моделировании распространения волн в грунтовом массиве. Опыт показывает, что если размеры соседних элементов отличаются не более чем на 20-30%, то упомянутыми эффектами можно пренебречь. Пример дискретной области представлен на рисунке (рис. 2).

Если грунтовый массив состоит из различных слоев с ярко выраженными физико-механическими характеристиками, то это учитывается путем моделирования каждого слоя грунта элементами с конкретными физико-механическими характеристиками (модуль упругости, коэффициент Пуассона и др.), при этом деформативные свойства элемента каждого слоя грунта могут описываться различными уравнениями состояния.

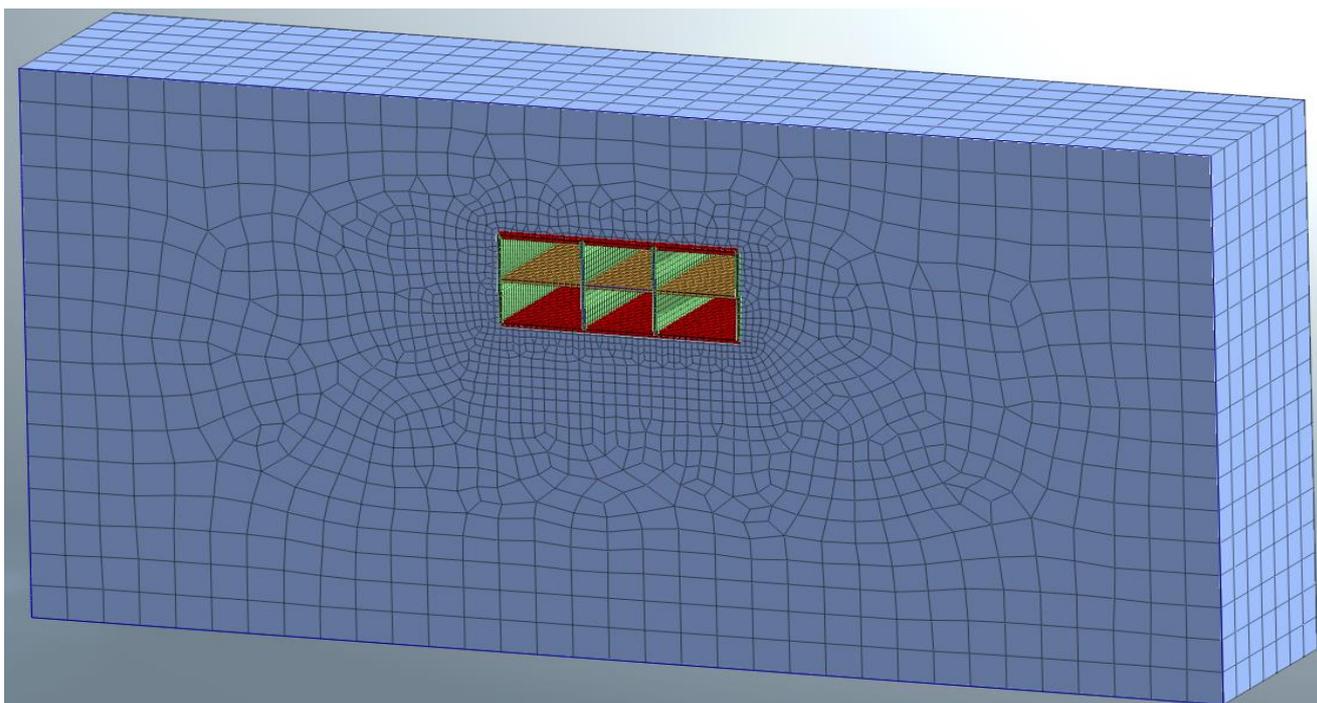


Рисунок 2 – Дискретная модель расчетной области

Figure 2 – Discrete model of the computational domain

Конечно-элементная модель ограждающих конструкций КСФС строится на основе пакета типовых конечных элементов. Железобетонные конструкции разбиваются на оболочечные конечные элементы, в работе элементов такого типа могут быть учтены деформации изгиба и сдвига. Для учета повреждений и дефектов в железобетонных конструкциях, выявленных при обследовании несущих конструкций, используются такие же стандартные оболочечные конечные элементы. При этом их физико-механические свойства назначаются по результатам обследования.

При разработке дискретной схемы необходимо учитывать и тот факт, что узлы конечных элементов конструкции должны взаимодействовать с соответствующими узлами грунта. Исходя из этого степень дискретизации ограждающих конструкций КСФС должна быть увязана с плотностью конечно-элементной сетки области грунта.

При разработке дискретной схемы необходимо учитывать и тот факт, что узлы конечных элементов конструкции должны взаимодействовать с соответствующими узлами грунта. Исходя из этого, степень дискретизации ограждающих конструкций КСФС должна быть увязана с плотностью конечно-элементной сетки области грунта [5].

Гексаэдральный объемный конечный элемент, применяемый для дискретизации грунтового массива, имеет три вектора перемещения $\{u\}$ в узле элемента (рис. 3).

Матричное уравнение движения элементов:

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{P(t)\} \quad (1)$$

описывает его поведение до появления неупругих деформаций.

Нелинейный характер работы грунтового массива приводит к системе нелинейных дифференциальных уравнений работу элементов в упругопластической стадии.

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{P(t)\} + \{F\}, \quad (2)$$

где $\{P(t)\}$ – столбец-вектор обобщенных сил, действующих на элемент;
 $\{F\}$ – столбец-вектор начальных узловых сил, обусловленный начальными напряжениями в элементах при их работе за пределами упругости.

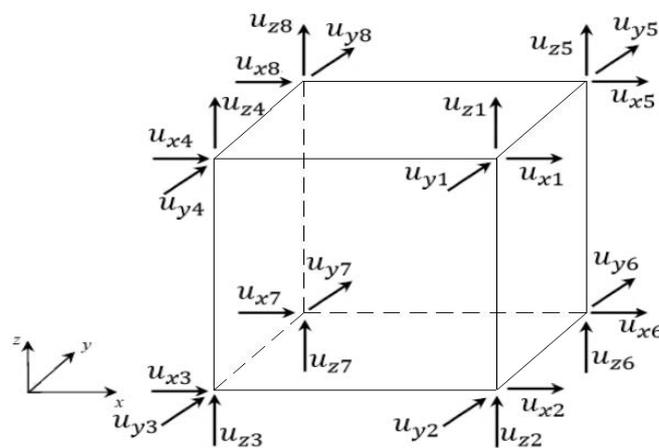


Рисунок 3 – Гексаэдральный конечный элемент перемещения

Figure 3 – Hexahedral finite element of displacement

Матрица масс $[m]$ и матрица жесткости $[k]$ элемента определяются следующими выражениями.

$$[m] = \rho F l \int_0^1 N^T N d\xi \quad (3)$$

$$[k] = [B][D][B]^T V \quad (4)$$

где $[B]$ – матрица деформирования;
 $[D]$ – матрица упругих характеристик материала;
 V – объем элемента.

Для того, чтобы построить матрицу жесткости элемента необходимо выразить перемещения точек внутри элемента $\{u\} = \{u(x, y, z) \ v(x, y, z) \ w(x, y, z)\}$ через перемещения его узлов $\{q\}_i$, другими словами установить зависимость вида

$$\{u\} = [N]\{q\}_i. \quad (5)$$

Здесь $[N]$, так называемая, матрица интерполяционных функций, которая в данном случае будет иметь восемь блоков, по числу узлов

$$[N] = [[N]^{(1)} \dots [N]^{(k)} \dots [N]^{(8)}], \quad (6)$$

каждый из которых равен

$$[N]^{(k)} = E_3 N_k(x, y, z), \quad (7)$$

где E_3 - единичная матрица третьего порядка.

Интерполяционные функции $N_k(x, y, z)$ обычно формулируют не в общей системе координат x, y, z , а в местной, трехмерной нормализованной, имеющей для гексаэдра вид

$$\xi = \frac{x-x_c}{a}; \quad \eta = \frac{y-y_c}{a}; \quad \zeta = \frac{z-z_c}{a} \quad (8)$$

x_c, y_c, z_c - координаты центра тяжести гексаэдра.

В этих координатах интерполяционная функция будет иметь вид

$$N_k(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8} (1 + \eta_k \eta)(1 + \xi_k \xi)(1 + \zeta_k \zeta) \quad (9)$$

и представляет собой интерполяционный полином первого порядка. Физический смысл выражения $N_k(\xi, \eta, \zeta)$ заключается в том, что каждая из зависимостей представляет собой отношение объема соответствующего заштрихованному параллелепипеду с вершиной в данной точке к объему всего конечного элемента [6].

Деформации внутри элемента определяются через перемещения его узлов посредством, так называемой, матрицы деформаций $[B]$, содержащей восемь стандартных блоков, которые входят в качестве сомножителей в подынтегральное выражение соотношения:

$$[B] = [[B]^{(1)} \dots [B]^{(k)} \dots [B]^{(8)}], \quad (10)$$

Стандартный блок матрицы деформаций определяется с помощью соотношения:

$$[B]^{(k)} = [\Phi] N_k(x, y, z) \quad (11)$$

где $[\Phi]$ матрица дифференциальных операторов:

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (12)$$

После дифференцирования получим

$$[B] = \frac{1}{8a} \begin{bmatrix} \xi_k(1 + \eta_k \eta)(1 + \zeta_k \zeta) & 0 & 0 \\ 0 & \eta_k(1 + \xi_k \xi)(1 + \zeta_k \zeta) & 0 \\ 0 & 0 & \zeta_k(1 + \xi_k \xi)(1 + \eta_k \eta) \\ \eta_k(1 + \xi_k \xi)(1 + \zeta_k \zeta) & \xi_k(1 + \eta_k \eta)(1 + \zeta_k \zeta) & 0 \\ 0 & \zeta_k(1 + \xi_k \xi)(1 + \eta_k \eta) & \eta_k(1 + \xi_k \xi)(1 + \zeta_k \zeta) \\ \zeta_k(1 + \xi_k \xi)(1 + \eta_k \eta) & 0 & \xi_k(1 + \eta_k \eta)(1 + \zeta_k \zeta) \end{bmatrix}$$

$$[D] = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

Матрица вязкости [C] определяется из выражения:

$$[C] = \alpha_1[m] + \alpha_2[k], \tag{13}$$

где: α_1 и α_2 – произвольные коэффициенты пропорциональности.

Конечно-элементная модель конструкций фортификационного сооружения котлованного типа строится на основе пакета типовых конечных элементов. Рамный каркас разбивается на оболочечные конечные элементы, воспринимающие изгибные, продольные, и сдвиговые деформации. Эти конечные элементы наделяются свойствами железобетонных плит, которые могут деформироваться в различных стадиях. При разработке дискретной модели схемы необходимо учитывать, что узлы конечных элементов грунта должны взаимодействовать с соответствующими узлами конечных элементов конструкции, примыкающих к грунту. Степень дискретизации ограждающих конструкций на конечные элементы должна быть увязана с плотностью конечно-элементной области грунта.

Оболочечный конечный элемент [7] характеризуется вектором усилий {f} (рис. 4) и вектором узловых перемещений {u} (рис. 5).

$$\{f\} = \{N_{xx}, N_{xy}, Q_{zx}, M_{xy}, M_{xx}, N_{yy}, N_{xy}, Q_{yz}, M_{xy}, M_{yy}, N_{xx}, N_{xy}, Q_{zx}, M_{xy}, M_{xx}, N_{yy}, N_{xy}, Q_{yz}, M_{xy}, M_{yy}\}^T; \tag{14}$$

$$\{U\} = \{u_1, v_1, w_1, \theta_{xz1}, \theta_{yz1}, u_2, v_2, w_2, \theta_{xz2}, \theta_{yz2}, u_3, v_3, w_3, \theta_{xz3}, \theta_{yz3}, u_4, v_4, w_4, \theta_{xz4}, \theta_{yz4}\}^T \tag{15}$$

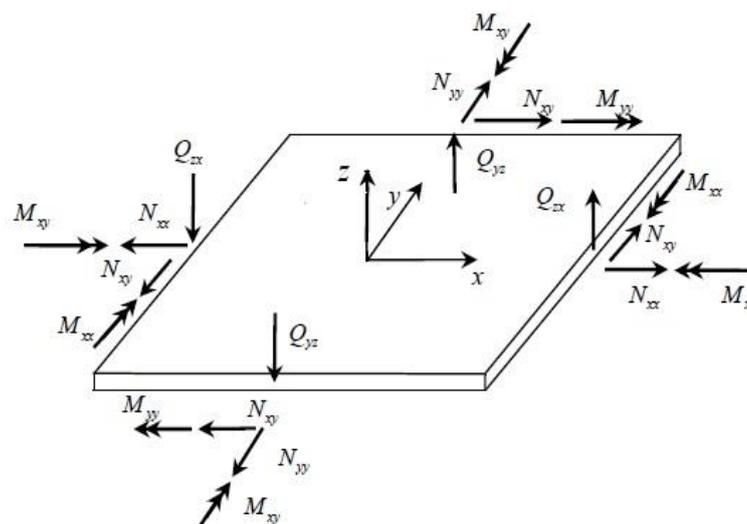


Рисунок 4 – Векторы усилий оболочечного конечного элемента

Figure 4 – Vectors of efforts of the shell finite element

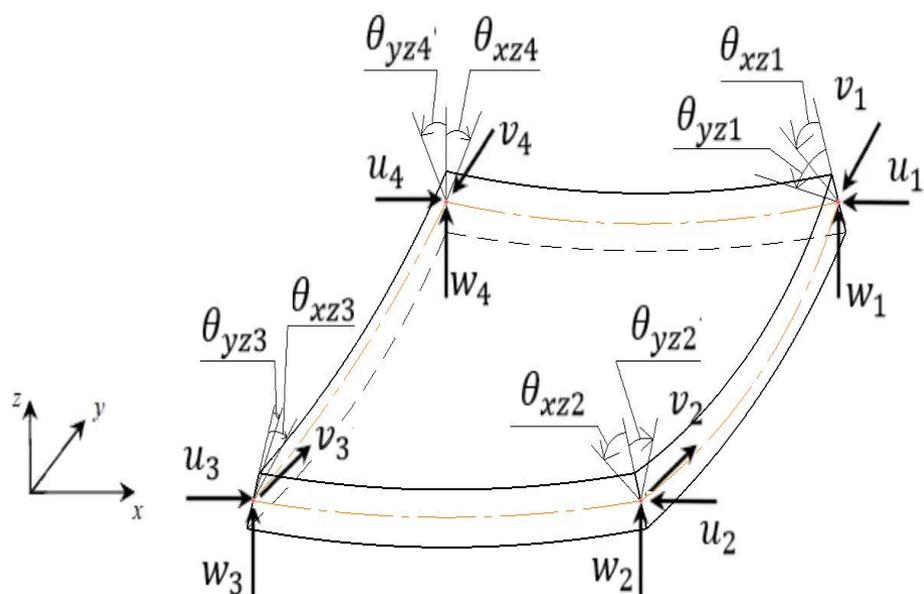


Рисунок 5 – Векторы узловых перемещений оболочечного конечного элемента

Figure 5 – Vectors of nodal displacements of the shell finite element

Точность результатов расчета, получаемых на основе МКЭ, зависит, в первую очередь, от степени и характера дискретизации решаемой области на конечные элементы. Как правило, в численных решениях, наряду с точностью рассматривается вопрос экономии ресурсов ЭВМ, что в конечном итоге приводит к необходимости применения оптимальных дискретных схем, удовлетворяющих по точности и требуемым ресурсам вычислительной технике.

Методика расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений в нескальных грунтах на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций, реализована в вычислительной программе MIDAS GTS NX. В основе алгоритма численного решения задачи лежит пошаговое совместное интегрирование разрешающих уравнений, описывающих динамическое поведение грунтового массива и строительных конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений. В целом же методика расчета включает и ряд вспомогательных операций, в том числе связанных с построением расчетной схемы и подготовкой исходной численной исходной схемы и подготовкой численной информации для машинного счета [8].

Основные операции методики следующие:

- проведение обследования строительных конструкций;
- выявление дефектов и повреждений;
- ввод исходных данных, их обработка и предварительные вычисления;
- построение дискретной модели строительных конструкций и грунтового массива;
- формирование матрицы жесткости ансамбля конечных элементов с учетом дефектов и повреждений;
- формирование нагрузки, действующей на расчетную область в соответствии с заданной моделью сейсмозрывного воздействия;
- совместное интегрирование разрешающих уравнений области решения на один шаг с учетом взаимодействия грунта и строительных конструкций КСФС;
- определение НДС грунтового массива на основе уравнений состояния, определяющих упругое и упругопластическое деформирование;

– определение НДС строительных конструкций.

Результатом расчета является напряженно-деформированное состояние несущих конструкций и нескального грунта.

Научная новизна методики в отличие от существующих состоит в том, что позволяет в расчете реконструируемых КСФС учесть фактическое состояние несущих конструкций, что в свою очередь наиболее полно отражает напряженно-деформированное состояние несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений.

Теоретическая значимость заключается в обосновании применения теорий механики континуума, упругости и пластичности и метода конечных элементов и начальных напряжений при расчете несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений на воздействия сейсмозрывных волн ядерного взрыва в процессе проектирования реконструкции КСФС.

Практическая значимость разработанной методики заключается в возможности применения для оценки фактического состояния несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений после воздействия динамических нагрузок.

Достоверность численных решений необходимо сравнить с результатами натурного эксперимента. НИЦ 26ЦНИИ МО РФ в 2004 и 2005 гг. в рамках КНИР «Котлован» [9Ошибка! Источник ссылки не найден.] произведены экспериментальные исследования параметров волновых полей, генерируемых в грунтовых массивах при многократном действии БПОС.

Экспериментальные исследования, позволяющие оценить влияние многократности воздействия на параметры возбуждаемых сейсмозрывных волн (СВВ), реализующихся в преградах и грунтовых массивах, имеют важное значение для оценки действия поражающих факторов обычных средств поражения (ОСП) на конструкции защитных сооружений. Полученные при этом экспериментальные данные необходимы для тестирования численных методик расчета СФС и преград на взрывные нагрузки, а также методик расчета областей разрушения преград при взрывах заглубленных зарядов ВТО в различных средах. Исследуемые волновые поля генерируются в массиве мягкого грунта.

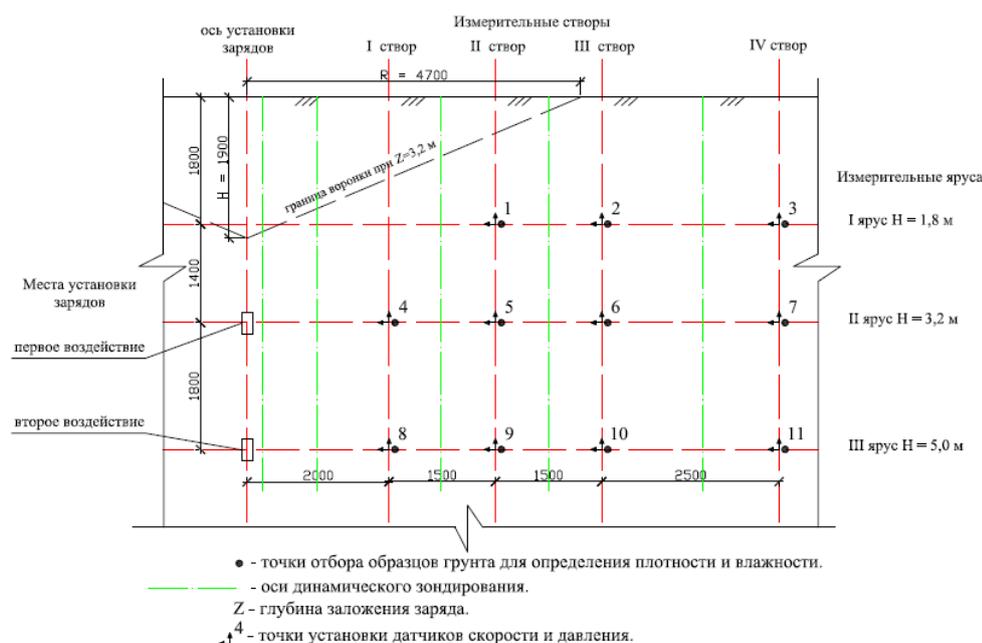


Рисунок 6 – Расчетная схема эксперимента

Figure 6 – Calculation scheme of the experiment

Физико-механические характеристики грунта приведены в таблице (табл. 1).

Таблица 1 – Физико-механические характеристики грунта

Table 1 – Physical and mechanical characteristics of the soil

№ п/п	Наименование характеристики	Единица	Символ	Величина
1.	Модуль деформации	МПа	E	10
2.	Коэффициент Пуассона	-	ν	0,28
3.	Удельный вес	кг/м ³	γ	2000
4.	Сцепление	МПа	C_s	0,02
5.	Угол внутреннего трения	градусы	φ	20

Произведем данный эксперимент согласно разработанной методике в программном комплексе MIDAS GTX NS. Для этого создадим расчетную область и дискретную модель, изображенную на рисунке (рис. 7).

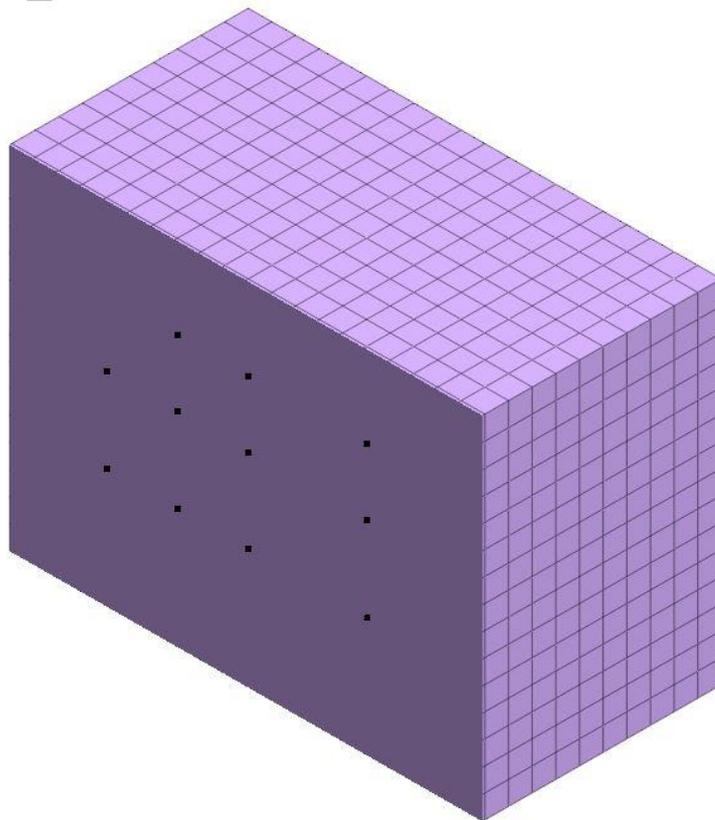


Рисунок 7– Дискретная модель эксперимента

Figure 7 – Discrete model of the experiment

Сравнение результата численного решения с экспериментальными данными по смещениям и скоростям смещений точек приведены на рисунках (рис. 8, 9).

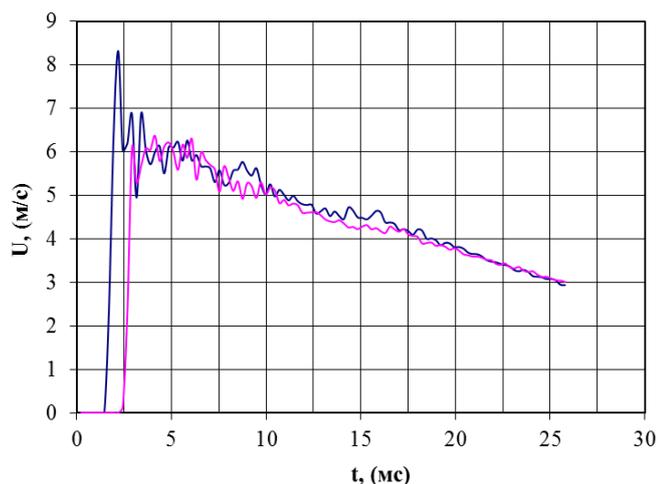


Рисунок 8 – Зависимость горизонтальных скоростей от времени на глубине 5 м

Figure 8 – Dependence of horizontal velocities on time at a depth of 5 m

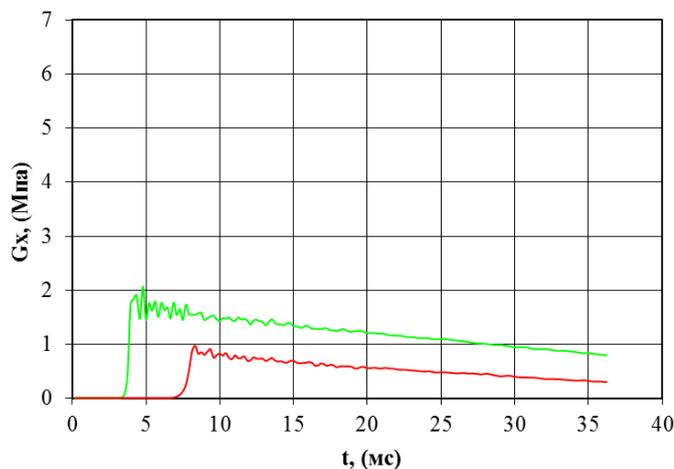


Рисунок 9 – Зависимость давления от времени на глубине 5 м

Figure 9 – Dependence of pressure on time at a depth of 5 m

Анализ приведенных результатов эксперимента и численного решения позволяет сделать следующие выводы:

- закономерности изменения во времени горизонтальных скоростей и давления (рис. 8, 9), полученные экспериментальным путем, хорошо согласуются с численными результатами;
- экспериментальные среднестатистические максимальные относительные значения горизонтальных скоростей и давления и полученные расчетом по предложенной методике лежат в пределах доверительного интервала эксперимента;
- максимальные абсолютные значения горизонтальных скоростей и давления также лежат в пределах доверительного интервала эксперимента и отличаются от его среднестатистических значений не более чем на 5%. Несовпадения абсолютных значений горизонтальных скоростей, представленных на рисунке (рис. 8), составляют 18%.

3. Вывод

Разработанная методика пространственного расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений в нескальных грунтах на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва в отличие от существующих позволяет учесть фактическое состояние несущих конструкций, что в свою очередь наиболее полно отражает напряженно-деформированное состояние несущих конструкций котлованных. Она позволяет выполнить оценку фактического состояния несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений после воздействия динамических нагрузок.

В методике четко обосновывается применение теорий механики континуума, упругости и пластичности и методов конечных элементов и начальных напряжений при расчете несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений на воздействия сейсмозрывных волн ядерного взрыва в процессе проектирования реконструкции КСФС.

Список литературы

1. Короленок Л.М., Галушко М.М., Плоцкий П.В. Влияние грунтовых условий на сейсмостойкость специальных подземных сооружений при воздействии землетрясений // *Военный инженер*. 2016. №2. С. 21–24.
2. Логачев Н.А., Шерман С.И., Леви К.Г. Геодинамическая активность литосферы, ее интегральная оценка и связь с сейсмичностью. Современная тектоническая активность Земли и сейсмичность. Докл. 19 Всес. совещ., Москва, янв., 1986. М., 1987. С. 97–108.
3. Бабичев А.И. Методика расчета котлованных фортификационных сооружений прямоугольного профиля при сверхрасчетных воздействиях динамических нагрузок от ядерного взрыва. Ленинград. Инв. № 29740. 1990. 336 с.
4. Ольшанко А.В. Расчет конструкций специальных фортификационных сооружений прямоугольной формы на взрывное воздействие во внутреннем объеме. СПб. Инв. № 31521. 2003. 165 с.
5. Строкова Л.А. Пособие «Динамика грунтов». Издательство Томского политехнического университета. 2018. С.234
6. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. Пер. с англ. М.: Стройиздат. 1982. 447 с.
7. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Расчет конструкций специальных сооружений: Учеб. Пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат. 1990. 208 с.
8. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. Пер. с англ. М.: Стройиздат. 1982. 447 с.
9. КНИР «Котлован» НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ. 2004 год

References

1. Korolenok L.M., Galushko M.M., Plockij P.V. Vliyanie gruntovykh uslovij na sejsmostojkost' special'nykh podzemnykh sooruzhenij pri vozdejstvii zemletyasenij. *Voennyj inzhener*. 2016, no. 2, pp. 21–24. [In Russian]
2. Logachev N.A., Sherman S.I., Levi K.G. Geodinamicheskaya aktivnost' litosfery, ee integral'naya ocenka i svyaz' s sejsmichnost'yu. *Sovremennaya tektonicheskaya aktivnost' Zemli i sejsmichnost'*. Dokl. 19 Vses. soveshch., Moskva, yanv., 1986. M., 1987, pp. 97–108. [In Russian]

3. Babichev A.I. Metodika rascheta kotlovannykh fortifikacionnykh sooruzhenij pryamougol'nogo profilya pri sverkh raschetnykh vozdeystviyakh dinamicheskikh nagruzok ot yadernogo vzryva. Leningrad. Inv. № 29740. 1990, 336 p. [In Russian]
4. Ol'shanko A.V. Raschet konstrukcij special'nykh fortifikacionnykh sooruzhenij pryamougol'noj formy na vzryvnoe vozdeystvie vo vnutrennem ob'eme. SPb. Inv. № 31521. 2003, 165 p. [In Russian]
5. Strokova L.A. Posobie «Dinamika gruntov». Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2018, p. 234. [In Russian]
6. Bate K., Vil'son E. Chislennye metody analiza i metod konechnykh ehlementov. Per. s angl. M.: Strojizdat. 1982, 447 p. [In Russian]
7. Popov N.N., Rastorguev B.S. Raschet konstrukcij special'nykh sooruzhenij: Ucheb. Posobie dlya vuzov. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Strojizdat. 1990, 208 p. [In Russian]
8. Bate K., Vil'son E. Chislennye metody analiza i metod konechnykh ehlementov. Per. s angl. M.: Strojizdat. 1982, 447 p. [In Russian]
9. KNIR «Kotlovan» NIC 26 CNII MO RF. 2004 god. [In Russian]

Информация об авторах / Information about the authors

Короленок Леонид Михайлович, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Фортификация и маскировка» Военного института (Инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева.

Санкт-Петербург, Российская Федерация

e-mail: leonid.korolenok@mail.ru

тел.: +7 921 332-79-91

Leonid M. Korolenok, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Fortification and Camouflage, Military Institute (Engineering and Technical) Military Academy of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulev.

St. Petersburg, Russian Federation

e-mail: leonid.korolenok@mail.ru

phone: +7 921 332-79-91

Снегирев Алексей Евгеньевич*, главный инженер Центра государственной экспертизы федеральной службы войск национальной гвардии РФ. Москва, Российская Федерация

e-mail: alexeyspbrus@mail.ru

тел.: +7 903 254-27-39

Alexey E. Snegirev*, Chief Engineer of the Center for State Expertise of the Federal Service of the National Guard Troops of the Russian Federation. Moscow, Russian Federation

e-mail: alexeyspbrus@mail.ru

phone: +7 903 254-27-39

Сорокин Никита Васильевич, инженер группы инженерных изысканий Центра государственной экспертизы федеральной службы войск национальной гвардии РФ.

Москва, Российская Федерация

e-mail: sorokita1999nikita@gmail.com

тел.: +7 995 997-61-49

Nikita V. Sorokin, engineer of the engineering survey group of the Center for State Expertise of the Federal Service of the National Guard Troops of the Russian Federation.

Moscow, Russian Federation

e-mail: sorokita1999nikita@gmail.com

phone: +7 995 997-61-49

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author