

УДК 624.15

**Мирсаяпов И.Т.** – доктор технических наук, профессор

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

**Брехман А.И.** – доктор технических наук, профессор

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

**Пискунов А.А.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [a.piskunov@is-md.ru](mailto:a.piskunov@is-md.ru)

**Королева И.В.** – старший преподаватель

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

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

## **Расчетная модель деформирования грунтового основания трубопровода**

### **Аннотация**

Объектом моделирования являются основание и строительные конструкции теплотрассы. Прокладка трубопроводов теплотрассы выполнена в земляной насыпи высотой от 1,7 до 3,4 м. Исследуемая площадка являлась подтопленной, местность заболочена. Грунты основания находятся в зоне колебания грунтовых вод. При создании модели рассматривалось совместное деформирование насыпи теплотрассы и трубопровода в условиях длительного деформирования основания насыпи. Авторами разработана методика создания расчетной модели грунтового массива основания и трубопровода. Раскрыт характер деформирования основания и развития напряжений в трубопроводе. Показан характер развития напряжений, перемещений и деформаций трубопровода, опор трубопровода и грунта основания. Разработана модель совместного деформирования системы «грунтовое основание – грунтовая насыпь – трубопровод – опоры трубопровода».

**Ключевые слова:** расчетная модель, грунтовое основание, грунтовая насыпь, трубопровод.

Объектом моделирования являлась подземная теплотрасса бесканальной прокладки, из стальных труб с изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке. Прокладка трубопроводов теплотрассы, согласно [3], выполняется в земляной насыпи высотой от 1,7 до 3,4 м (в пределах исследуемой части теплотрассы от УТ-2 до УТ-10), абсолютные черные отметки поверхности земли до возведения насыпи составляют от 67,90 м до 69,90 м, проектные абсолютные отметки верха насыпи – от 70,70 м до 71,60 м. План теплотрассы приведен на рис. 1.

В качестве тепловодов применены стальные трубы из стали марки 20, наружным диаметром от 325 мм до 630 мм и толщиной стенки от 7 до 8 мм (на рассматриваемом участке теплотрассы). Трубопроводы смонтированы в две параллельные нитки, расстояние между осями труб составляет от 830 до 1050 мм.

По длине рассматриваемого участка теплотрассы выполнены тепловые камеры (УТ), неподвижные опоры (Н) и дренажные колодцы.

Ввод трубопроводов в тепловые камеры выполняется в стальных гильзах, которые закладываются при монтаже стен камер.

Расстояние участков теплотрассы между тепловыми камерами составляет от 87,5 м до 162 м.

Неподвижные опоры трубопроводов устраиваются около тепловых камер и представляют собой сооружение из монолитного железобетона, состоящее из горизонтальной плиты, передающей нагрузку от трубопроводов на грунт основания и вертикальной стенки, через которую проходят нитки трубопроводов.

Плитная часть неподвижной опоры имеет толщину от 500 до 700 мм, длину от 3,5 до 6,1 м и ширину от 3,5 до 5,1 м. Под плитой опоры выполняется бетонная подготовка из бетона класса В 7,5 толщиной 100 мм. Стенка неподвижной опоры имеет толщину 750 мм. Общая высота опоры составляет от 2,3 до 2,8 м. Согласно [3], основанием неподвижной опоры служит суглинок тугопластичной консистенции.

Прокладка трубопроводов теплотрассы выполнена в земляной насыпи высотой от 1,7 до 3,4 м. Исследуемая площадка являлась подтопленной, местность заболочена. Грунты основания насыпи находятся в зоне колебания уровня грунтовых вод.

В связи с тем, что основанием насыпи служат слои слабых грунтов на глубину до 5,2 м от черной отметки земли, исследуемая насыпь может значительно проседать из-за уплотнения грунта основания и его выжимания в стороны из-под насыпи. При этом глубина сжимаемой толщи может равняться ширине насыпи снизу.

Поэтому выполняется проверочный расчет прогнозной осадки основания. Для расчета осадок основания выбираем участок трубопровода между неподвижными опорами (рис. 1а).

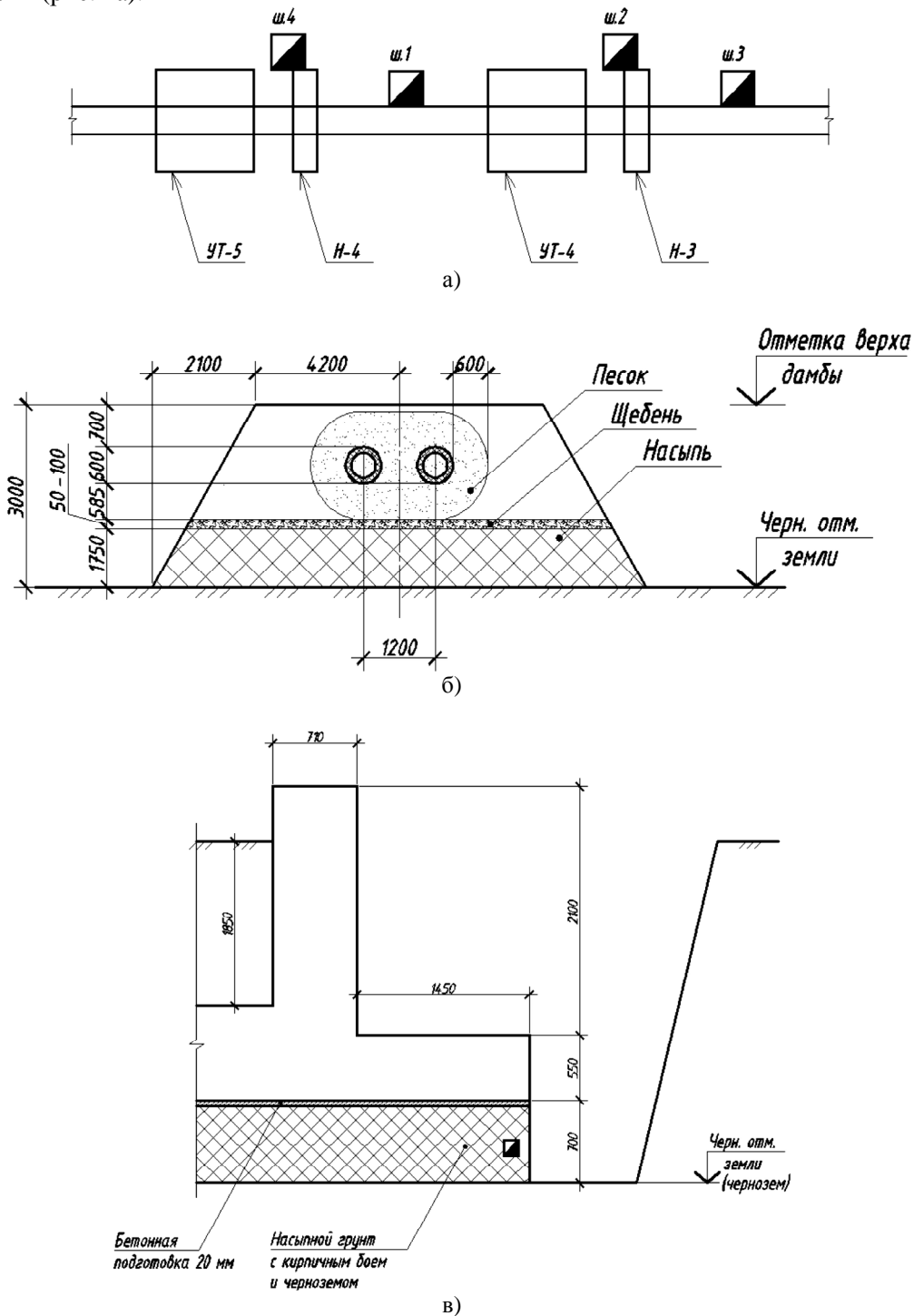


Рис. 1. а) схема участка теплотрассы; б) схематичный разрез тела насыпи; в) схематичный разрез опоры трубопровода

Схема к расчету осадки насыпи приведена на рис. 2 и в табл.

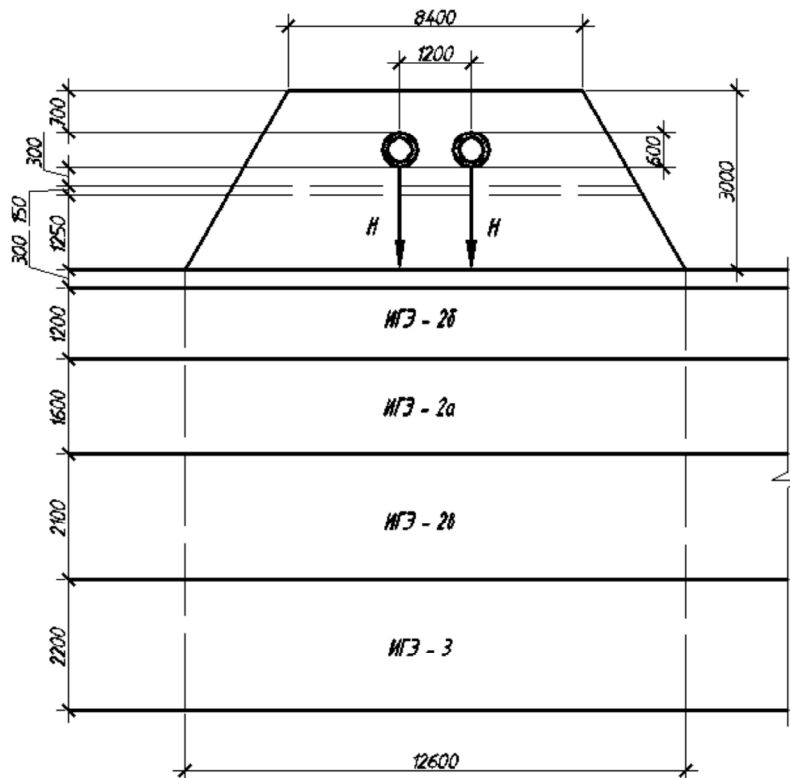


Рис. 2. Схема к расчету осадки основания насыпи

Таблица

**Основные физико-механические характеристики грунта**

Наименование	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$\gamma_s$ , г/см <sup>3</sup>	$j$ , град	$c$ , кПа	$E$ , МПа	$e$	$W$
ИГЭ – 2б	1,90/1,91	2,71	8,7/7,8	7,3/6,5	9,3/8,0	0,802	0,26
ИГЭ – 2а	1,90/1,92	2,71	13,9/11,3	12,1/10,1	11,0/8,6	0,780	0,25
ИГЭ – 2в	1,87/1,88	2,71	13,9	5,8	4,1	0,783	0,24
ИГЭ – 3	1,92/1,93	2,65	30,9	0,8/0,7	21,5	0,658	

При обеспеченной устойчивости основания производится расчет его осадки под действием внешних нагрузок от насыпи и нагрузок от трубопровода. Осадка основания насыпи определяется как сумма вертикальных деформаций по оси насыпи всех слоев основания в пределах активной зоны деформирования. В качестве нижней границы активной зоны деформирования принимается горизонт, на котором дополнительные напряжения от внешней нагрузки  $S_{zp}$  не превышают 20 % от собственного веса грунта  $S_{zq}$ .

Конечная величина стабилизированной осадки определяется методом послойного суммирования с использованием зависимости:

$$S = \sum_{i=1}^h e_{pz_i} \cdot h_i, \tag{1}$$

где  $h_i$  – мощность  $i$ -го расчетного слоя;

$e_{pz_i}$  – относительная деформация грунта при компрессионном сжатии при давлениях в диапазоне от природного  $S_{zq}$  до суммарного значения  $(S_{zq} + S_{zp})$  на данном горизонте.

Расчет осадки основания насыпи производится для четырех значений давления на основание  $P_1, P_2, P_3, P_4$  [2]:

$$P_1 = P_{без}^{нач}, P_2 = P_{без}^{нач} + \Delta P, P_3 = P_{без}^{нач} + 2\Delta P, P_4 = P_{рас}^{нач}.$$

Безопасная нагрузка для условий быстрой отсыпки ( $P_{без}^{нач}$ ) определяется по формуле:

$$P_{без}^{нач} = \frac{c_{нач} + g_{ср} \cdot z \cdot tg j_{нач}}{B}, \quad (2)$$

где  $j_{нач}, c_{нач}$  – угол внутреннего трения и удельное сцепление слабого грунта основания при природной влажности-плотности на глубине  $z$ ;

$z$  – глубина расположения расчетного горизонта от поверхности основания насыпи;

$g_{ср}$  – средний удельный вес грунтовой толщи, расположенной выше горизонта  $z$  с учетом взвешивающего действия воды;

$B$  – функция угла внутреннего трения  $j_{нач}$  и формы эпюры нагрузки.

Расчетная нагрузка для случая быстрой отсыпки насыпи ( $P_{без}^{нач}$ ) определяется из выражения:

$$P_{без}^{нач} = g_H (H_p + S_k - h_{Hb}) + g_{H.вз.} h_{Hb}, \quad (3)$$

где  $g_{H.вз.}$  – удельный вес грунта ниже уровня грунтовых вод;

$H_p$  – расчетная высота насыпи;

$S_k$  – конечная осадка насыпи;

$h_{Hb}$  – высота слоя грунта ниже уровня грунтовых вод.

После определения значений осадки насыпи и неподвижных опор вычисляются деформации трубопровода. Трубопровод, уложенный в траншею насыпи, испытывает нагрузки, вызванные весом грунта и весом жидкости в трубе, и вступает во взаимодействие с засыпным материалом и стенками траншеи. На практике это означает, что окружающий грунт и стенки траншеи удерживают трубу от деформации. Положительное влияние грунта можно рассматривать как эффективное снижение нагрузки на стенки трубы в результате бокового отпора грунта. Деформирование длинной трубы, расположенной внутри оседающей насыпи (длина  $\approx 160$  м), жестко закрепленной на неподвижных опорах, происходит по сложной траектории.

Для этого производится компьютерное моделирование длинного гибкого стержня (при помощи программы ЛИРА 9.4). При создании модели рассматривается совместное деформирование насыпи теплотрассы и трубопровода в условиях длительного деформирования основания насыпи.

При моделировании совместного деформирования системы «грунтовое основание насыпи – грунтовая насыпь – трубопровод – опоры трубопровода», трубопровод представляется в виде длинного гибкого стержня на упруго оседающих (податливых) опорах [1].

Определение внутренних усилий и деформаций трубопровода производилось с использованием расчетного комплекса ЛИРА 9.4, реализующего метод конечных элементов. При этом конструкция трубопровода моделировалась балочными элементами (кэ № 10), а для учета податливых свойств грунтов, являющихся основанием трубопровода, использовались устанавливаемые с шагом 1 м одноузловые конечные податливые конечные элементы № 51 с жесткостью  $K_1$ . Определение последней производилось на основании модели Винклера по формуле:

$$K_1 = \frac{P_1}{S_1} \cdot A_1, \quad (4)$$

где  $P_1$  – среднее давление;

$S_1$  – осадка насыпи;

$A_1$  – площадь опирания трубопровода в пределах полосы шириной  $b = \frac{pd}{2}$ ,

где  $d$  – диаметр трубы.

Для учета податливости крайних опор были также введены податливые связи жесткостью:

$$K_2 = \frac{P_2}{S_2} \cdot A_2, \tag{5}$$

где  $P_2$  – среднее давление под подошвой неподвижной опоры;

$S_2$  – осадка неподвижной опоры;

$A_2$  – площадь подошвы опоры.

Расчетная схема представлена на рис. 3.

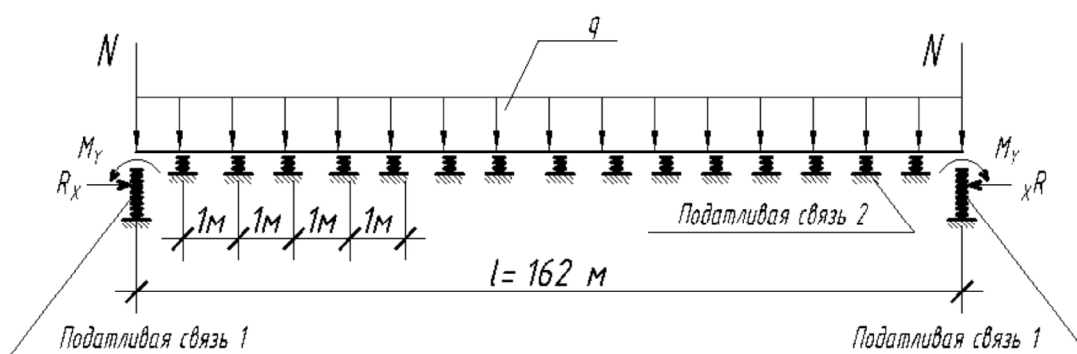


Рис. 3. Расчетная схема трубопровода

Результаты численного исследования совместного деформирования системы «грунтовое основание – насыпь – трубопровод» приведены на рис. 4.

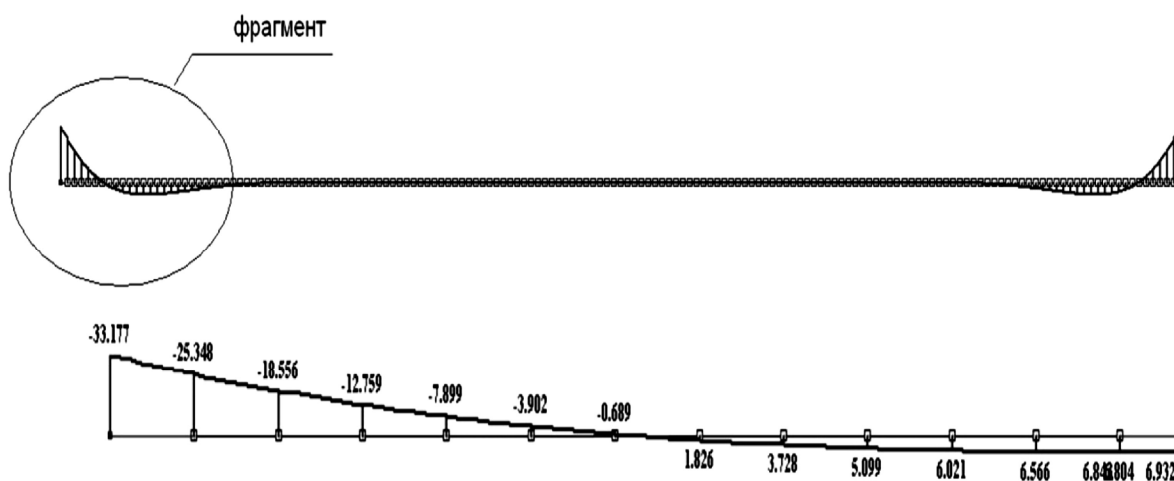


Рис. 4. Эпюра изгибающих моментов трубопровода

Как видно из рис. 4, учет совместного деформирования всех элементов системы приводит к существенному снижению деформаций (осадок) трубопровода.

Сопоставление результатов расчета осадок трубопровода показало хорошую сходимость их фактических значений осадок, полученных в процессе геотехнического мониторинга (отклонение  $\approx 15\%$ ) (рис. 5).

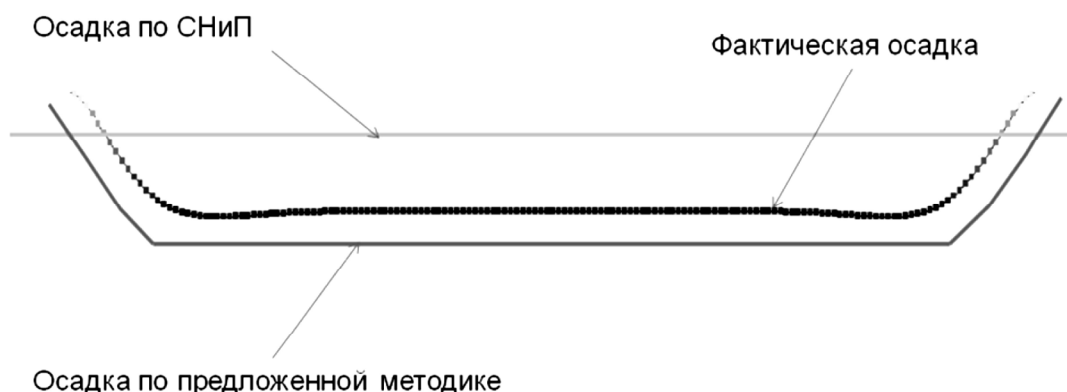


Рис. 5. Сопоставление результатов расчета с фактическими данными мониторинга

**Вывод.** Разработанная расчетная модель совместного деформирования системы «трубопровод – насыпь – грунтовое основание» с использованием схемы Винклера позволяет адекватно описывать деформирование стального трубопровода с учетом деформаций грунта насыпи и водонасыщенного основания насыпи (отклонение между расчетными и фактическими данными осадок составляет не более 15 %).

### Список литературы

1. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В., Нуриева Д.М. Моделирование деформирования грунтового основания трубопровода // Сб. трудов научн.-техн. конф. «Численные методы расчетов в практической геотехнике» (Санкт-Петербург, 1-3 февраля 2012 г.). – СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2012. – С. 71-76.
2. Руководство по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. – М.: Транспорт, 1978.
3. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на объекте: «Инженерные сети жилого комплекса «Светлая долина» М-1 Высокогорского района РТ», ООО «Казаньприборпроект». – Казань, 2007.

**Mirsayapov I.T.** – doctor of technical sciences, professor

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

**Brechman A.I.** – doctor of technical sciences, professor

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

**Piskunov A.A.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [a.piskunov@is-md.ru](mailto:a.piskunov@is-md.ru)

**Koroleva I.V.** – senior lecturer

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

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### Calculation model of deformation of the pipeline ground base

#### Resume

The object model is the foundation and building construction heating. Piping heating performed in an earthen embankment height from 1,7 to 3,4 m. The investigated area was waterlogged, swampy terrain. Primers are located in the base zone of groundwater fluctuations. When you create a model of joint deformation of embankment considered heating and piping in a long-term deformation of the embankment foundation. The authors developed a method of creating computational models of soil mass basis and the pipeline. Revealed the nature of the

deformation of the base and the stresses in the pipeline. The nature of the development of stresses, displacements and deformations of the pipeline, pipe supports and foundation soil. A model of joint deformation of the «ground foundation – dirt mound – pipeline – pipeline support». The developed computational model of joint deformation of the «pipeline – barrow – subgrade» using the Winkler scheme can adequately describe the deformation of steel pipe, taking into account the deformation of soil mounds and mounds of water-saturated grounds.

**Keywords:** calculation model, ground base, ground embankment, the pipeline.

### References

1. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V., Nuriyeva D.M. Modeling of deformation subgrade piping // Prog. scientific-technical works. conference. «Numerical methods of calculations in practical geotechnics» (St. Petersburg, February 1-3, 2012). – St. Petersburg. Univ Civil Engineering, 2012. – P. 71-76.
2. Guidelines for designing road embankment on soft ground. – M.: Transport, 1978.
3. Report on engineering-geological surveys on the subject: «Engineering Network of the residential complex «Light Valley» M-1 RT Vysokogorsky area RT», LLC «Kazanpriborproekt». – Kazan, 2007.