

УДК 624.012.3.(35)

В.И. МЕЛИХОВ¹, канд. техн. наук, заместитель генерального директора по научной работе (V.Melikhov@vniizhbeton.ru); Б.С. СОКОЛОВ², канд. техн. наук, заведующий лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций (moo-shell@mail.ru)

¹ ООО «Институт ВНИИжелезобетон» (111141, г. Москва, ул. Плеханова, 7)

² Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева (НИИЖБ), АО «НИЦ «Строительство» (109428, Москва, ул. 2-я Институтская, 6)

Проектирование бетонных и железобетонных безнапорных труб

Методическое пособие «Расчет и конструирование бетонных и железобетонных безнапорных труб» разработано в развитие положений СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», устанавливающего общие требования к расчету и конструированию железобетонных конструкций, и СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы» в части расчета и конструирования бетонных и железобетонных безнапорных труб, используемых в наружных подземных сетях водоотвода и канализации. Пособие содержит рекомендации по расчету и конструированию безнапорных бетонных и железобетонных ненапряженных труб с круглым отверстием, учитывающие их конструктивные особенности и условия эксплуатации в безнапорных трубопроводах, монтируемых открытым (траншейным) способом и закрытым (бестраншейным) методом микротоннелирования. Изложенные в пособии теоретические положения, инженерные методики и рекомендации иллюстрируются рядом подробных примеров определения нагрузок на трубы и внутренних усилий в конструкции, конструирования и расчета бетонных и железобетонных труб по предельным состояниям.

Ключевые слова: бетонные трубы, железобетонные трубы, безнапорные трубы, расчет по прочности, расчет по образованию трещин, конструирование.

Для цитирования: Мелихов В.И., Соколов Б.С. Проектирование бетонных и железобетонных безнапорных труб // Бетон и железобетон. 2021. № 3 (605). С. 40–44.

V.I. MELIKHOV¹, Candidate of Science (Engineering), Deputy General Director for Research (V.Melikhov@vniizhbeton.ru);

B.S. SOKOLOV², Candidate of Science (Engineering), Head of the Laboratory for Thin-Walled and Spatial Structures (moo-shell@mail.ru)

¹ «Institute VNIIZhelezobeton» LLC (7, Plekhanova Street, 111141, Moscow, Russian Federation)

² Research, Design and Technological Institute for Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, "Research and Development Center "Stroitel'stvo" AO (6, 2nd Institut'skaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Design of Concrete and Reinforced Concrete Pressure-Free Pipes

The methodological manual "Calculation and Construction of Concrete and Reinforced Concrete Pressure-free Pipes" is developed in the development of the provisions of SP 63.13330.2018 "SNiP 52-01-2003 Concrete and Reinforced Concrete Structures. Basic Provisions", which establishes general requirements for the calculation and design of reinforced concrete structures, and SP 35.13330.2011 "SNiP 2.05.03-84* Bridges and Pipes" in terms of the calculation and design of concrete and reinforced concrete non-pressure pipes used in outdoor underground drainage and sewerage networks. The manual contains recommendations for the calculation and design of non-pressure concrete and reinforced concrete non-stressed pipes with a round hole, taking into account their design features and operating conditions in non-pressure pipelines mounted by the open (trench) method and closed (trenchless) microtunneling method. The theoretical provisions, engineering methods and recommendations set out in the manual are illustrated by a number of detailed examples of determining the loads on pipes and internal forces in the structure, designing and calculating concrete and reinforced concrete pipes according to the limit states.

Keywords: concrete pipes, reinforced concrete pipes, pressure-free pipes, strength calculation, crack formation calculation, designing.

For citation: Melikhov V.I., Sokolov B.S. Design of concrete and reinforced concrete pressure-free pipes. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 3 (605), pp. 40–44. (In Russian).

В строительных нормах СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» и СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы», в развитие положений которых разработано пособие «Расчет и конструирование бетонных и железобетонных безнапорных труб», установлены общие требования к расчету и конструированию железобетонных конструкций без конкретных указаний в части расчета и конструиро-

вания бетонных и железобетонных безнапорных труб, используемых в наружных подземных сетях водоотвода и канализации. Между тем экспериментальные исследования и опыт эксплуатации трубопроводов показывают, что работа таких труб при силовых воздействиях, испытываемых ими в грунте, имеет свои особенности, требующие учета при проектировании. В основополагающих работах Г.К. Клейна [1, 2] даны теоретические положения расчета труб подземных

трубопроводов. Методы расчета и конструирования бетонных и железобетонных труб, основанные на результатах исследований, опыте проектирования и промышленного производства, приведены с различной степенью детальности в ряде работ [3–7], однако инженерной практикой востребован обобщающий методический документ по проектированию труб для безнапорных трубопроводов в различных условиях эксплуатации.

Пособие распространяется на проектирование бетонных и железобетонных труб с круглым отверстием, предназначенных для строительства трубопроводов, транспортирующих самотеком бытовые и производственные жидкости, атмосферные, сточные и подземные воды, неагрессивные к бетону и стальной арматуре. При проектировании бетонных и железобетонных труб, предназначенных для эксплуатации в условиях воздействия агрессивной среды, должны предусматриваться дополнительные мероприятия в соответствии с требованиями норм и стандартов по антикоррозионной защите конструкций.

В пособии рассматриваются бетонные и железобетонные трубы для открытой укладки в траншею, а также железобетонные трубы для микротоннелирования – бестраншейного способа прокладки подземных трубопроводов, основанного на проталкивании (продавливании) за проходческим комплексом железобетонных труб с цилиндрической наружной поверхностью.

Технические требования к бетонным безнапорным трубам содержит ГОСТ 20054–2016 «Трубы бетонные безнапорные. Технические условия»; к железобетонным трубам для открытой укладки – ГОСТ 6482–2011 «Трубы железобетонные безнапорные. Технические условия»; к железобетонным трубам для микротоннелирования – ГОСТ Р 58323–2018 «Трубы железобетонные для бестраншейной прокладки инженерных сетей. Технические условия». В пособии приведены конструктивно-технические решения бетонных и железобетонных труб и их геометрические параметры.

Пособие содержит следующие рекомендации по назначению физико-механических характеристик материалов для труб:

- для изготовления труб следует применять тяжелый или мелкозернистый бетон классов по прочности на сжатие не ниже В30;

- для бетонных труб рекомендуется применять бетоны классов по прочности на осевое растяжение в проектном возрасте не ниже $B_r 3,2$;

- при изготовлении железобетонных труб, укладываемых в траншеи, следует применять бетоны классов по прочности при сжатии не менее В30 и марок по водонепроницаемости W4–W8;

- при изготовлении железобетонных труб для микротоннелирования следует применять бетоны клас-

сов по прочности на сжатие не менее В40 и марок по водонепроницаемости не ниже W8;

- для армирования железобетонных труб используются ненапряженные одинарные или двойные цилиндрические спиральные каркасы, состоящие из стальных проволочных спиралей и продольных разделительных стержней, свариваемых друг с другом. В качестве спиральной арматуры используется проволока периодического профиля диаметром 3–5 мм класса В_p-I, отвечающая требованиям ГОСТ 6727–80, и диаметром 6–10 мм класса А400, отвечающая требованиям ГОСТ 5781–82, или классов А500 и А600 по ГОСТ 34028–2016. Допускается применение проволоки гладкого профиля класса В500 по ГОСТ 6727. Для продольного армирования стальных каркасов рекомендуется использовать стержневую арматуру классов А400 и А500 по ГОСТ 34028. Допускается применение стержней гладкого профиля диаметром 6–8 мм из сталей класса А240 по ГОСТ 34028 или ГОСТ 5781;

- для труб с полимерной футеровочной облицовкой на внутренней поверхности чехлы футеровки следует изготавливать из полиэтилена низкого давления (PE) по ГОСТ 16338–85 или полипропилена (PP) по ГОСТ 26996–86. Футеровочные чехлы свариваются из листов толщиной не менее 3 мм с анкерующими элементами для крепления чехла в бетоне.

Общие рекомендации пособия по выполнению расчета бетонных и железобетонных труб соответствуют требованиям норм и заключаются в следующем.

Расчеты выполняются по предельным состояниям I и II групп. Расчет сечений железобетонных труб следует производить на основе нелинейной деформационной модели или на основе предельных усилий. Расчеты труб выполняются с использованием трехлинейной диаграммы деформирования бетона на действие эквивалентной нагрузки, приложенной по образующей, применяемой при испытании труб методом нагружения (ГОСТ 20054–2016; ГОСТ 6482–2011).

Расчет и конструирование бетонных труб для заданной глубины заложения сводится к подбору толщины t ее стенки в цилиндрической части и класса бетона на осевое растяжение B_r или при заданной толщине стенки t – к подбору класса бетона B_r с проверкой прочности трубы.

Расчет и конструирование железобетонной трубы при заданной глубине ее заложения и толщине цилиндрической части сводится, как правило, к подбору рабочей спиральной и продольной арматуры с проверкой величины раскрытия трещин в бетоне при контрольной нагрузке.

Расчетная методика, изложенная в пособии, позволяет проектировать бетонные и железобетонные трубы с учетом фактических геологических условий строительного объекта и заданных условий их укладки.

Важнейшим вопросом при проектировании трубопроводов является сбор и определение нагрузок на трубы.

В пособии приведена классификация и методика определения нагрузок на трубы для трех основных способов их открытой укладки: в траншею, в насыпь и в прорезь на различные типы оснований, в том числе ниже уровня грунтовых вод. Грунты засыпки и грунты оснований трубопроводов условно разделены на четыре группы (I–IV), для каждой из которых приведены соответствующие деформационные характеристики.

Нагрузки, действующие на трубы, подразделяются на постоянные и временные. К постоянным нагрузкам относятся собственный вес трубы и давление грунта засыпки (вертикальное и горизонтальное).

Временные нагрузки подразделяются на нагрузки длительного и кратковременного действия. К временным нагрузкам длительного действия относятся гидростатическое давление грунтовых вод и вес транспортируемой жидкости. К кратковременным нагрузкам относятся давление, передающееся через грунт от подвижной нагрузки нерегулярного движения автомобильного транспорта максимального класса АК11 под нагрузку Н11 (вертикальное и горизонтальное), и вертикальное давление, передающееся через грунт от равномерно-распределенной нагрузки на поверхности 5 кН/м^2 (в местах, где движение транспорта невозможно). Следует отметить, что трубы не рассчитывают на временные нагрузки длительного действия от регулярного движения автотранспорта, так как согласно п. 6.7.1 СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения» пересечения самотечными (безнапорными) канализационными подземными трубопроводами из любых материалов (кроме чугунных труб) автомобильных дорог любых категорий должны устраиваться в футлярах, например, железобетонных.

В пособии приведены расчетные формулы для определения нагрузки от собственного веса круглой трубы и трубы с подошвой в зависимости от геометрических размеров поперечного сечения и удельного веса материала.

Нагрузка от вертикального и горизонтального давлений грунта засыпки на трубы зависит от способа их укладки. При строительстве трубопроводов открытым способом применяют следующие методы укладки труб: в траншею или в насыпь на грунтовое непрофилированное, или профилированное, или железобетонное основание, а также в прорезь на песчаную подушку. В пособии приведены характеристики грунтов засыпки труб по группам грунта. Даны рекомендации по степени послойного уплотнения грунта в пазухах траншеи; рекомендации по назначению ширины дна и крутизны откосов траншеи. Приведены расчетные формулы для определения вертикального

и горизонтального давлений в зависимости от условий укладки труб, высоты засыпки трубы грунтом, диаметра трубы и др.

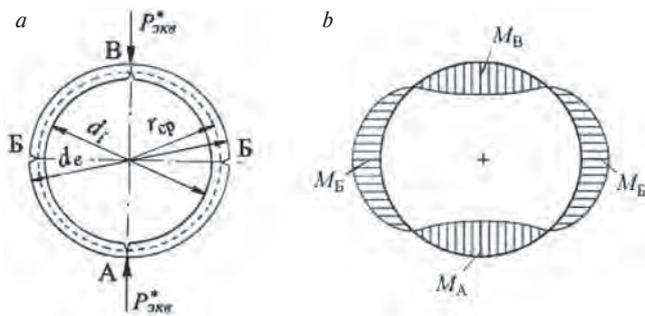
Нагрузка от гидростатического давления грунтовых вод представляет собой равнодействующую от равномерного давления, равного напору воды над трубой, и давления, вызывающего всплытие. В пособии приведена расчетная зависимость величины нагрузки от гидростатического давления грунтовых вод от внешнего диаметра трубы.

Нагрузка от давления транспортируемой жидкости представляет собой равнодействующую давления на внутреннюю поверхность трубы и зависит от уровня наполнения трубопровода и внешнего диаметра трубы. В пособии представлена расчетная зависимость для вертикальной нагрузки от атмосферных сточных и бытовых канализационных вод.

Нагрузка от автомобильного транспорта представлена передающимися через грунт засыпки на трубы горизонтальным и вертикальным давлениями от временных подвижных нагрузок на поверхности земли. Максимальная допускаемая в расчетах труб нагрузка от автомобильного транспорта – класса АК11 (Н11). Давление от транспортных колесных средств класса АК11 (Н11) рассчитывается согласно рекомендациям СП 35.13330.2018 в зависимости от глубины засыпки грунта над верхом трубы. В пособии представлены расчетные формулы и табличные данные для вычисления равнодействующих расчетной вертикальной и горизонтальной нагрузок от воздействия транспортных средств в зависимости от величин соответствующих давлений, внешнего диаметра трубы, вида грунта основания трубопровода и степени уплотнения грунта засыпки. Для трубопроводов, прокладываемых в местах, где движение транспорта исключено, в качестве временной нагрузки на поверхности земли принимают равномерно-распределенную нагрузку интенсивностью 5 кН/м^2 .

Для упрощения расчетов и сопоставления расчетных нагрузок с фактической несущей способностью труб, полученной при их испытании нагружением по ГОСТ 8829–2018, каждая равнодействующая из вертикальных и горизонтальных нормативных (или расчетных) нагрузок Q_i приводится к эквивалентной линейной нагрузке, а их совместное действие – к вертикальной эквивалентной линейной нормативной нагрузке $P_{\text{ЭКВ}}$ или расчетной $P_{\text{ЭКВ}}^*$.

Внутренние усилия (изгибающие моменты) в продольных сечениях стенки трубы от действия вертикальных и горизонтальных нагрузок определяют как для кольцевых изгибаемых элементов, находящихся в условиях плоской деформации. Для практических целей рекомендуется выполнять статический расчет труб с использованием эквивалентной вертикальной линей-



Расчетная схема и эпюра изгибающих моментов в поперечном сечении стенки трубы: а – схема действия нагрузки $P_{экр}^*$; б – эпюра изгибающих моментов

Calculation scheme and the bending moments diagram in the cross-section of the pipe wall: а – scheme of the load $P_{экр}^*$ action; б – diagram of the bending moments

ной нагрузки $P_{экр}^*$, действующей на трубу в верхней точке В (шелыга) и в нижней точке А (лоток) в противоположном направлении в качестве реакции отпора (рис., а). При этом допускается не учитывать горизонтальные нагрузки, частично разгружающие трубу.

Максимальный изгибающий момент в вертикальном диаметральной сечении единичной длины (рис., б) составит:

$$M_A = M_B = 0,318 \cdot P_{экр}^* \cdot r_{cp};$$

в горизонтальном диаметральной сечении:

$$M_B = 0,182 \cdot P_{экр}^* \cdot r_{cp},$$

где r_{cp} – радиус срединной поверхности трубы.

При расчете железобетонных труб по первой группе предельных состояний (при проверке прочности) в отсутствие воздействия агрессивных сред следует учитывать перераспределение изгибающего момента в стенке трубы на уровне вертикального и горизонтального диаметров:

$$M'_A = M'_B = M'_B = 0,25 \cdot P_{экр}^* \cdot r_{cp} \cdot b.$$

В случае воздействия средне- и сильноагрессивной среды расчетные изгибающие моменты принимаются без учета их перераспределения.

Расчет бетонных труб по первой группе предельных состояний выполняется как изгибаемого бетонного элемента из условия:

$$M_{max} \leq M_{ult} = \gamma_{b1} R_{bt} W,$$

где M_{max} – максимальный изгибающий момент, возникающий в лотке или шелыге трубы при наиболее неблагоприятном сочетании расчетных значений внешних нагрузок; $\gamma_{b1} = 0,9$ – коэффициент условий работы для бетонных конструкций; R_{bt} – расчетное сопротивление бетона растяжению; W – момент сопротивления прямоугольного продольного сечения трубы, в качестве которого допускается использовать упругопластический момент сопротивления сечения $W_{pl} = \frac{bt^2}{3,5}$.

В расчете прочности продольного сечения стенки железобетонной трубы как изгибаемого железобетонного элемента должно обеспечиваться условие:

$$M_{max} \leq M_{ult}$$

где M_{ult} – предельный расчетный изгибающий момент, который может быть воспринят продольным сечением стенки трубы, рассчитываемый для труб с одинарным или двойным каркасом в соответствии с требованиями СП 63.13330.2018.

Расчет железобетонных труб по второй группе предельных состояний сводится к проверке трещинообразования и ширины раскрытия трещин по методике СП 63.13330.2018 с учетом специфики труб, заключающейся в криволинейности их поперечного сечения. В формулу для расчета ширины раскрытия трещины вводится коэффициент, зависящий от диаметра трубы, существенно снижающий расчетную ширину раскрытия трещин для труб малого диаметра.

Принято, что предельно допустимая ширина раскрытия трещин $a_{crc,ult}$ не должна превышать значений:

- 0,2 мм для труб, укладываемых открытым способом (кроме укладываемых в насыпях);
- 0,3 мм для труб, укладываемых в насыпях;
- 0,1 мм для труб, монтируемых микротоннелированием.

В пособии приведены подробные рекомендации по расчету и конструированию армирования железобетонных труб с одинарным и двойным спиральным каркасом для открытой укладки.

Для расчета железобетонных труб, монтируемых методом микротоннелирования (закрытой проходкой), в пособии приведена методика определения нагрузок вертикального и горизонтального давлений грунта в соответствии с рекомендациями СП 102.13330.2012 «СНиП 2.06.09–84 Туннели гидротехнические», а также методика определения продольных усилий в поперечных кольцевых сечениях стенки трубы. Расчет кольцевых сечений производят на действие продольных усилий, передающихся на трубы при их проталкивании за проходческим комплексом по условно прямолинейному или криволинейному участку тоннеля (СТО НОСТРОЙ 2.17.66–2012 «Освоение подземного пространства. Коллекторы и тоннели канализационные. Требования к проектированию, строительству, контролю качества и приемке работ»). В пособии приведены необходимые данные для выполнения расчета: коэффициенты снижения усилия продавливания для различных грунтов, коэффициенты трения и адгезии материала трубы с грунтом и т. д. Приведены рекомендации по выполнению расчета труб на прямолинейных и криволинейных участках трубопроводов.

Бетонные и железобетонные трубы с плоской подошвой, используемые при открытой укладке трубопроводов, более эффективны по сравнению с трубами, имеющими цилиндрическую опорную наружную поверхность, так как подвергаются существенно меньшим эквивалентным нагрузкам и не требуют тру-

доемкого устройства профилированного основания. Такие трубы проектируют с одинарным спиральным каркасом или с несколько более экономичным овоидальным каркасом. В пособии приведены рекомендации по конструированию труб с плоской подошвой.

Трубы с внутренней полимерной облицовкой используются в трубопроводах, транспортирующих агрессивные жидкости, например хозяйственно-бытовые канализационные. В расчете прочности труб с полимерным чехлом изгибающий момент в горизонтальном диаметральном сечении должен определяться с учетом наличия и типа облицовки. Этот момент не должен превышать момента трещинообразования бетона с учетом его упругопластической работы.

Изложенные в пособии методики иллюстрируются подробными примерами расчета:

1. Расчет бетонной трубы диаметром условного прохода $d_i=600$ мм с плоской подошвой, укладываемой в траншею с высотой засыпки $H=2,2$ м суглинком (группа Г-III).

2. Расчет железобетонной трубы для открытой укладки диаметром условного прохода $d_i=600$ мм без подошвы с толщиной цилиндрической части $t=65$ мм, 3-й группы по несущей способности, армированной одинарным спиральным каркасом. Труба для трубопровода, транспортирующего слабоагрессивные жидкости, укладывается на грунтовое (супесь, группа Г-III) профилированное основание с углом охвата $2\alpha^0=90^0$.

3. Расчет железобетонной трубы с подошвой диаметром условного прохода $d_i=2000$ мм с толщиной стенки в цилиндрической части $t=200$ мм, 3-й группы по несущей способности, армированной двойным спиральным каркасом, для трубопровода, транспортирующего слабоагрессивные жидкости. Труба укладывается на утрамбованный грунт (супесь, группа Г-III) выше уровня грунтовых вод.

4. Расчет железобетонной трубы для микротоннелирования внутренним диаметром $d_i=1500$ мм типа Т (рядовая), монтируемой в трубопроводе на глубине $H=8$ м с использованием бентонитового раствора, закачиваемого в затрубное пространство. Трубопровод для транспортирования слабоагрессивных жидкостей прокладывается в грунтах с коэффициентом крепости $f=0,2$. Максимальное расстояние между домкратными шахтами не превышает 150 м.

5. Расчет бетонной трубы с внутренней полимерной облицовкой диаметром условного прохода $d_i=800$ мм с плоской подошвой, укладываемой в траншею с высотой засыпки $H=4$ м суглинком (группа Г-III). Труба укладывается на утрамбованный грунт для безнапорного трубопровода ливневой канализации, расположенного выше уровня грунтовых вод. В качестве полимерной облицовки используются по-

липропиленовые листы толщиной $t_{л}=4$ мм с анкерами типа V-LOCK высотой $t_a=13$ мм.

Во всех представленных примерах выполнено уточнение геометрических параметров трубы; выполнен расчет нагрузок на трубу; определены расчетные усилия, а также контрольные испытательные нагрузки. В примерах расчета бетонных труб в результате выполненных расчетов определен минимальный класс бетона по прочности на растяжение. В примерах расчета железобетонных труб в результате выполненных расчетов подобрано спиральное и продольное армирование, проведена проверка величины раскрытия трещин.

Список литературы

1. Клейн Г.К. Расчет труб, уложенных в земле. М.: Госстройиздат, 1957. 195 с.
2. Клейн Г.К. Расчет подземных трубопроводов. М.: Стройиздат, 1969. 240 с.
3. Попов А.Н. Бетонные и железобетонные трубы. М.: Стройиздат, 1973. 269 с.
4. Виноградов С.В. Расчет подземных трубопроводов на внешние нагрузки. М.: Стройиздат, 1980. 135 с.
5. Сенкевич Т.П., Рагольский С.З., Померанец В.Н. Железобетонные трубы / Под ред. С.З. Рагольского. М.: Стройиздат, 1989. 272 с.
6. Лисов В.М. Дорожные водопропускные трубы. М.: «ТИМР», 1998. 140 с.
7. Пособие по проектированию водоотводных и дренажных систем. М.: ФАУ ФЦС.2019. https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp35_2019.pdf

References

1. Klein G.K. Raschet trub, ulozhennyh v zemle [Calculation of pipes laid in the ground]. Moscow: Gosstroyizdat. 1957. 195 p.
2. Klein G.K. Raschet podzemnyh truboprovodov [Calculation of underground pipelines]. Moscow: Stroyizdat. 1969. 240 p.
3. Popov A.N. Betonnye i zhelezobetonnye truby [Concrete and reinforced concrete pipes]. Moscow: Stroyizdat. 1973. 269 p.
4. Vinogradov S.V. Raschet podzemnyh truboprovodov na vneshnie nagruzki [Calculation of underground pipelines for external loads]. Moscow: Stroyizdat. 1980. 135 p.
5. Senkevich T.P., Ragolsky S.Z., Pomeranets V.N. Zhelezobetonnye truby [Reinforced concrete pipes]. Moscow: Stroyizdat. 1989. 272 p.
6. Lisov V.M. Dorozhnye vodopropusknye truby [Road culverts]. Moscow: «TIMR». 1998. 140 p.
7. Posobie po proektirovaniyu vodootvodnyh i drenaznyh system [Manual for the design of water drainage and drainage systems]. Moscow: FAU FCS. 2019. https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp35_2019.pdf (In Russian).