

УДК 627:556.53

В. В. АГЕЕВА¹, канд. техн. наук, доц. кафедры гидравлики; **Д. А. КОЖАНОВ¹**, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры теории сооружений и технической механики; **Е. А. ЛЮКИНА¹**, студент; **М. А. РЕШЕТНИКОВ²**, канд. техн. наук, доц. кафедры водных путей и гидросооружений

**УЧЕТ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ
ОБВОДНЕННОГО ОДИНОЧНОГО КАРЬЕРА**

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-91; (910)795-34-66; эл. почта: luykinakatya@yandex.ru

²ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»

Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 5. Тел.: (831) 218-44-13

Ключевые слова: русловой карьер, антропогенные нарушения русловых процессов, гидрологический режим реки, твердый сток, посадка уровня, моделирование речного потока.

Выполнены подробная оценка влияния разработки карьера на гидрологические условия реки и сравнение данного влияния с рекомендациями и требованиями действующих нормативных документов.

В связи с увеличением объемов строительства возникает острая потребность в качественных строительных материалах, что, в свою очередь, сопровождается необходимостью разработки все новых карьеров. Аллювиальные отложения рек являются наиболее качественными строительными материалами (песок, песчано-гравийная смесь, гравий). Однако карьер, располагаемый в русле реки, оказывает влияние на гидрологический, гидравлический, гидрогеологический и русловый режимы реки. Изменения в режиме реки распространяются на значительном расстоянии вниз и вверх по течению от карьера. Изменения могут протекать в негативном ключе и оказывать влияние на расположенную вблизи карьера инфраструктуру и сооружения.

Процесс добычи речного аллювия (песок, песчано-гравийная смесь (ПГС), песчано-гравийные материалы (ПГМ), гравий) связан с разработкой залежей русел рек с последующим использованием материала в промышленных целях в больших объемах. Такие нерудные строительные материалы (НСМ) считаются самыми чистыми, поскольку в их составе низкий уровень содержания примесей глины, камней и посторонних включений. Они высоко ценятся на строительном рынке, поскольку не требуют дополнительных вложений на очищение и по праву считаются незаменимым материалом. Состав НСМ достаточно однородный. Материал состоит из окатанных частиц песка и гравия с возможными включениями остатков органических веществ, ила и глины. Экологичность и однородность позволяет применять их повсеместно: в строительных, дорожных, сельскохозяйственных и декоративных работах, на производстве и в благоустройстве территории.

Однако механическое изменение рельефа русла, связанное с разработкой карьеров, приводит к изменению естественного руслового процесса. В общем виде взаимодействие карьера с потоком воды и руслом реки подробно описано в раз-

личных источниках [1, 2] и сводится к изменению гидравлических сопротивлений русла потоку, уровня и уклонов водной поверхности, скоростного поля потока, расхода донных и взвешенных наносов, форм транспорта наносов, крупности наносов, характера русловых деформаций выше и ниже карьера из-за резкого увеличения глубины потока.

Как правило, данные процессы протекают в негативном ключе и приводят к понижению уровней воды, увеличению уклонов водной поверхности, появлению неправильных течений, нарушению баланса наносов, снижению отметок дна, активации русловых процессов. При этом имеющимися в настоящее время руководящими документами [1, 2] особое внимание уделяется русловым переформированиям, занесению карьера и твердому стоку. Подобными проблемами заняты и сотрудники ведущих вузов, НИИ, о чем свидетельствуют многочисленные публикации [3, 4, 5].

С целью определения степени влияния расположенного в русле реки одиночного обводненного карьера на гидрологический и русловый режимы проводится комплекс исследований и расчетов, результаты которых проверяются на выполнение требований действующих нормативных документов.

Для достижения поставленной цели был выбран карьер, расположенный в русле реки Белой в Уфимском муниципальном районе Республики Башкортостан Приволжского федерального округа. Его местоположение показано на рис. 1. Запланированный объем выемки – 508,9 тыс. м³, мощность полезной толщи 9,9 м.



Рис. 1. Схема расположения карьера

На рассматриваемом участке реки Белой русло довольно извилистое, встречаются крутые изгибы, песчаные отмели, косы, острова, перекаты. Ширина русла в районе карьера при условном проектном уровне колеблется в пределах 180–265 м. По типу руслового процесса рассматриваемый участок реки Белой отнесен к свободному меандрированию, что наглядно иллюстрировано на рис. 1. Водный режим характерен для равнинных рек восточно-европейского типа с одновершинным весенним половодьем и довольно устойчивым ходом уровней в летний и зимние периоды.

В соответствии с положениями методики гидрографического районирования территории Российской Федерации, утвержденной Приказом МПР РФ от 25.04.2007 № 112 [6], река Белая в створе карьера относится к категории больших



рек, т. к. площадь бассейна более 50 тыс. км².

Сведения о гидрологическом режиме реки (о расходах, уровнях, ледоставе) были взяты по водомерному (в/п) и гидрологическому (г/п) постам «Охлебинино» и «Уфа», между которыми располагается карьер. Проектный уровень (ПУ) воды в районе карьера составил 83,01 м БС и определен интерполяцией.

Отправной точкой для оценки влияния одиночных обводненных карьеров на русловой и гидрологический режимы реки, является оценка многолетних деформаций речного русла (изменение конфигурации береговой линии, переформирования рельефа русла реки и т. д.), которые происходят под действием речного потока, изменения скорости и направления его движения. Для оценки многолетних деформаций речного русла было выполнено сопоставление различного картографического материала и произведен расчет твердого стока аналитическим путем.

Сопоставлением материалов карт, русловых изыскательских съемок различных годов и ГИС была проведена оценка многолетних деформаций и переформирований русла, которая показала, что за этот период существенных изменений русла и глубин реки в районе карьера не произошло. Выше по течению русловые переформирования выражаются размывом правого берега на ширину 55 м и левого берега – на 10–95 м. Участок выше и в месте планируемых работ относительно устойчив. Наблюдается размыв левого берега на 30–65 м и намыв правого берега на 25–65 м на протяжении 1270 м. Ниже по течению русловые деформации выражены попеременным размывом и намывом с преобладанием размыва в среднем на ширину 50 м по левой кромке, 90 м по правой.

Твердый сток оценивается по формуле Б. Ф. Снищенко и З. Д. Копалиани, рекомендуемой [1, 2]. Правомерность применения указанных формул подтверждается в данном случае грядовым рельефом русла реки Белой. По результатам расчетов получено, что расчетный средний годовой объем поступления донных наносов реки Белой на участке расположения карьера составил 0,25–2,78 тыс. м³. Полный суточный расход, определенный как произведение удельного расхода на ширину русла, составил 250,54 м³/сут в межень и достигает 2 777,7 м³/сут в половодье (экстремальное значение).

В дальнейшем для оценки влияния карьера на русловой и гидрологический режимы реки были выполнены следующие расчеты: расчет смещения верхней кромки карьера, расчет посадки уровня воды, выполнено численное моделирование речного потока в трехмерной постановке. При выполнении данных расчетов были учтены требования нормативных документов: при большой длине карьера на излучине свободного меандрирования отработку необходимо предусматривать с оставлением природоохранных целиков.

Расчет смещения верхней кромки, выполненный в соответствии с [1], показал, что скорость смещения верхней кромки карьера при его разработке составит 45,6 м/год. На полное заиление карьера потребуется 19,4 года (при его единовременной выемке).

Методика гидравлических расчетов посадки уровня воды, изложенная в [1, 7], несет в себе следующие предпосылки и математические зависимости: движение потока воды в реке считается установившимся; русло реки относительно долговременный период считается стабильным и не деформируется; движение потока воды в русле реки описывается системой дифференциальных уравнений движения.

Результаты гидравлических расчетов посадки уровня воды показали, что посадка уровня составит 11,5 см при единовременной (в пределах одной навигации) разработке участка ПГС на полную глубину (9,9 м) с оставлением природоохран-

ных целиков, что превышает общепринятый критериальный показатель 10 см [9], принимаемый для оценки допустимости разработки карьеров на реках согласно рекомендациям ГУ ГГИ и Санкт-Петербургского ГУВК. Исходя из этого, разработка карьера по такому варианту недопустима, так как влечет за собой негативное влияние на гидрологические условия участка. Приняв за значение посадки уровня воды критическое значение 10 см, вычислен критический объем выемки полезного ископаемого из русла, который составляет ~442,52 тыс. м³. С целью отработки всего запланированного объема карьера расчет критической выемки (с точки зрения посадки уровня) был скорректирован с учетом его заносимости. По результатам расчета минимальное время разработки карьера составило 3 года, а максимально допустимый объем навигационного блока ~169,63 тыс. м³. Так, при выемке в пределах 3 лет (3 навигаций) запланированного объема (508,9 тыс. м³) с оставлением природоохранных целиков посадка уровня составит 5,3 см.

Для выявления особенностей структуры потока на изгибе русла реки было применено численное моделирование в трехмерной постановке. Методы численного моделирования охватывают большие размеры систем уравнений гидравлики и, как следствие, наиболее полно отражают особенности структуры потока.

Решение задачи моделирования речного потока предлагается с использованием математической модели, основанной на решении полной трехмерной системы уравнений Навье-Стокса. Система уравнений дополняется уравнением неразрывности потока. Для описания турбулентных явлений в речном потоке используется зарекомендовавшая себя высокорейнольдсовая *k-ε* модель турбулентности. Эффективная вязкость в системе уравнений Навье-Стокса определяется согласно данной модели турбулентности. Система уравнений Навье-Стокса решается методом контрольных объемов, согласно которому вся расчетная область разбивается на простые трехмерные геометрические объекты. Расчетная область участка реки формировалась в виде твердотельной CAD-модели на основе гидрографических съемок.

В качестве граничных условий используются четыре условия: входная область потока; выходная область потока; дно реки – условие непротекания; свободная поверхность воды – условие симметрии.

Задача численного моделирования решалась для участка русла реки Белой в районе потенциального карьера между двумя живыми сечениями, перпендикулярными к динамической оси потока, в границах которого можно достоверно судить о характере распределения скоростей.

Расчеты были проведены для двух вариантов: до работ по разработке карьера (рис. 2а) и после разработки карьера (рис. 2б).

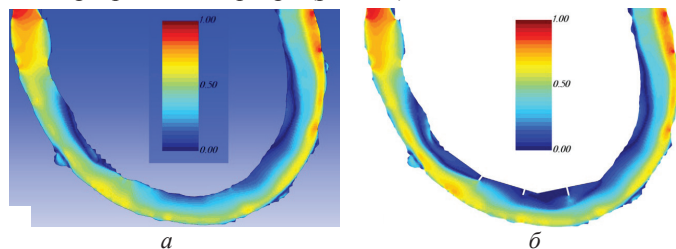


Рис. 2. Распределение скоростей течений речного потока: *а* – в естественном состоянии русла до разработки карьера; *б* – после разработки карьера

Анализируя результаты численного моделирования, можно сделать вывод, что при размещении карьера у правой кромки русла и при соблюдении технологии отработки (оставление природоохранных целиков) значительных изменений в гидрологическом режиме участка реки по сравнению с существующим режимом не будет.

Допустимые воздействия при разработке карьеров по добыче НСМ описаны в СТО 52.08.31–2012 [1] и для больших равнинных рек со свободным меандрированием следующие:

- карьеры должны эксплуатироваться в затопленном режиме при любой его длине. Эксплуатация карьеров в незатопленном режиме не допускается.
- карьеры рекомендуется размещать на низовых частях пляжей на излучинах свободного, незавершенного и ограниченного меандрирования (рис. 3).

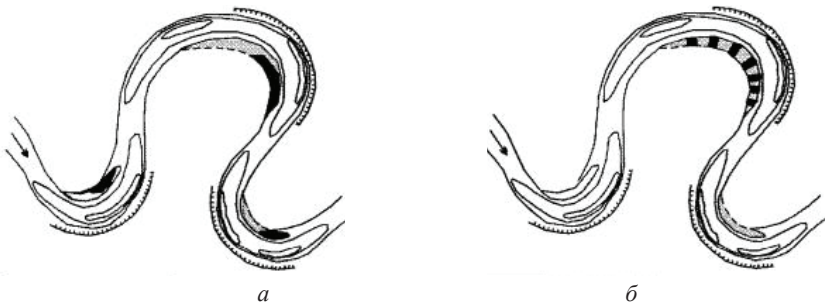


Рис. 3. Рекомендуемые места размещения русловых карьеров при свободном меандрировании: *а* – на низовой части излучины свободного меандрирования; *б* – в виде поперечных разрезов, не нарушающих морфологию русла [1]

– ниже по течению карьера следующий карьер или объект инженерной инфраструктуры должен быть удален на величину зоны размыва.

– габариты карьера не должны превышать: по ширине не более 0,25–0,3 ширины русла в половодье или паводок $B_k \leq (0,25-0,30) B_{п}$, по длине не более ширины русла в половодье или паводок ($L_k \leq B_{п}$).

– время заполнения карьера наносами (восстановления естественного гидравлического и руслового режимов) не должно превышать 20 лет ($T_k \leq 20$).

– объем карьера не должен превышать объема твердого стока за 20 лет ($W_k / W_T \leq 20$).

Предполагаемый карьер располагается на внутренней части излучины, которая подвергается намыву. Принятая разработка карьера блоками с оставлением природоохранных целиков соответствует схеме (рис. 3б). Такое местоположение карьера замедлит темпы искривления русла, что благоприятно скажется в т. ч. на судоходных условиях. Это подтверждается моделированием (рис. 2): целики не позволяют стрежню потока переместиться к правому берегу в область карьера. Карьер функционирует в затопленном режиме (условие затопленного режима выполняется). Вниз по течению других карьеров и объектов инженерной инфраструктуры нет. Габариты и объемы карьера, время заполнения его наносами соответствуют нормам. Ширина карьера 66,6 м, что соответствует максимальному значению при средней ширине реки (222 м) в районе расположения участка ПГС. Длина соответствует средней ширине русла реки. Время полного заиления карьера и восстановления естественного гидравлического и руслового режимов реки со-



ставит 19,4 года. Отношение предельного значения объема карьера (W_K) в сравнении с годовым стоком донных наносов (W_T) составило 15,6.

Проведенные расчеты и их анализ позволяют сделать вывод о допустимости влияния рассматриваемого карьера согласно требованиям СТО 52.08.31–2012 [1].

Рекомендации

С целью уменьшения посадки уровня с 11,5 до 5,3 см необходимо предусмотреть отработку карьера навигационными блоками на полную мощность с оставлением природоохранных целиков объемом, не превышающим 169,63 тыс. м³. Срок отработки карьера должен быть не менее 3 лет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СТО 52.08.31–2012. Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров. – Санкт-Петербург : Глобус, 2012. – 140 с. – ISBN 978-5-4391-0023-7. – Текст : непосредственный.

2. Рекомендации по прогнозу деформаций речных русел на участках размещения карьеров и в нижних бьефах гидроузлов / Государственный гидрологический институт, Институт гидрологии и метеорологии [и др.]. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1988. – 127 с. – Текст : непосредственный.

3. Ситнов, А. Н. Прогноз русловых деформаций и особенности разработки пойменных карьеров нерудных строительных материалов в меандрирующих руслах рек с учетом безопасности условий судоходства (на примере р. Белая) / А. Н. Ситнов, М. В. Шестова, Ю. Е. Воронина. – Текст : электронный // Научные проблемы водного транспорта. – Нижний Новгород, 2020. – Выпуск 65. – С. 179–188. – DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi65.138>.

4. Агеева, В. В. Мероприятия по снижению негативного воздействия на гидрологические и судоходные условия реки при разработке руслового карьера выправительными сооружениями / В. В. Агеева, Е. А. Люкина, М. А. Матюгин. – Текст : электронный // Научные проблемы водного транспорта. – Нижний Новгород, 2022. – Выпуск 71. – С. 199–212. – DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi71.257>.

5. Беркович, К. М. Исследование воздействия руслового карьера (ПК) нерудных строительных материалов (НСМ) на режим переката на верхней Оке / К. М. Беркович, Л. В. Злотина, А. К. Ильясов, Л. А. Турыкин. – Текст : непосредственный // Речной транспорт (XXI век). – Москва, 2016. – № 4. – С. 42–47. – ISSN 1729–4258.

6. Российская Федерация. Министерство природных ресурсов Российской Федерации. Об утверждении методики гидрографического районирования территории Российской Федерации : приказ Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 25.04.2007 г. № 112 : [зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 23 мая 2007 года № 9538]. – URL: <https://base.garant.ru/12153715/?ysclid=ldttr5kc2p342158036>. – Текст : электронный.

7. Методика расчета понижения уровней воды при добыче нерудных строительных материалов / Министерство речного флота РСФСР, Главное управление портов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1984. – 21 с. – Текст : непосредственный.

8. Чалов, Р. С. Русловые процессы (русловедение) : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям 05.03.04, 05.04.04 "Гидрометеорология" и 05.03.02, 05.04.02 "География" / Р. С. Чалов. – Москва : ИНФА-М, 2016. – 565 с. – ISBN 978-5-16-011036-3. – Текст : непосредственный.

9. Гладков, Г. Л. Оценка воздействия на окружающую среду инженерных мероприятий на судоходных реках / Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев, Ю. П. Соколов. – Санкт-Петербург : Изд-во А. Карданова, 2005. – 241 с. – ISBN 5-98175-008-1. – Текст : непосредственный.



AGEEVA¹ Vera Valerevna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of hydraulics; KOZHANOV¹ Dmitry Aleksandrovich, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the chair of theory of structures and technical mechanics; LYUKINA¹ Ekaterina Andreevna, student; RESHETNIKOV² Maksim Alekseevich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of waterways and hydraulic structures

CONSIDERATION OF CHANNEL PROCESSES DURING PLACEMENT OF A WATERED SOLITARY QUARRY

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 430-54-91; +7 (910) 795-34-66;
e-mail: luykinakaty@yandex.ru

²Volga State University of Water Transport
5, Nesterov St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 218-44-13

Key words: riverbed quarry, man-induced disturbance of fluvial processes, river hydrological regime, solid runoff, level planting, modeling a river stream.

The article gives a detailed assessment of the quarry development impact on the hydrological conditions of the river and a comparison of this effect with the recommendations and requirements of the current regulatory documents.

REFERENCES

1. STO 52.08.31–2012. Dobycha nerudnykh stroitelnykh materialov v vodnykh obektakh. Uchyot ruslovogo protsessa i rekomendatsii po proektirovaniyu i ekspluatatsii ruslovykh karerov [Extraction of non-metallic building materials in water bodies. Consideration of the channel process and recommendations for the design and operation of channel quarries]. – Saint-Petersburg : Globus, 2012. – 140 p. – ISBN 978-5-4391-0023-7.
2. Rekomendatsii po prognozu deformatsiy rechnykh rusel na uchastkakh razmesheniya karerov i v nizhnikh befakh gidrouzlov [Recommendations for the prediction of deformations of riverbeds at quarry sites and in the lower reaches of waterworks]. Gos. gidrolog. in-t, In-t gidrologii i meteorologii [i dr.]. – Leningrad : Gidrometeoizdat, 1988. – 127 p.
3. Sitnov A. N., Shestova M. V., Voronina Yu. E. Prognoz ruslovykh deformatsiy i osobennosti razrabotki poymennykh karerov nerudnykh stroitelnykh materialov v meandriuyuschikh ruslakh rek s uchyotom bezopasnosti usloviy sudokhodstva (na primere r. Belaya) [Channel deformations forecast and features of floodplain quarries of non-metallic construction materials development in meandering riverbeds based on safe navigation conditions (by the example of the Belaya river)] / Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport]. – Nizhny Novgorod, 2020. Issue 65. – P. 179–188. URL: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi65.138> (data obrasheniya: 29.10.2022).
4. Ageeva V. V., Lyukina E. A., Matyugin M. A. Meropriyatiya po snizheniyu negativnogo vozdeystviya na gidrologicheskie i sudokhodnye usloviya reki pri razrabotke ruslovogo karera vypravitelnymi sooruzheniyami [Measures to reduce the negative impact on the hydrological and navigational conditions of the river during the development of a channel quarry by correctional facilities] / Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport]. – Nizhny Novgorod, 2022. Issue 71. – P. 199–212. URL: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi71.257> (data obrasheniya: 01.11.2022).
5. Berkovich K. M., Zlotina L. V., Ilyasov A. K., Turykin L. A. Issledovanie vozdeystviya ruslovogo karera (RK) nerudnykh stroitelnykh materialov (NSM) na rezhim perekata na verkhney Oke [The research of the influence of non-metallic building materials run-of-river quarry on the Oka river rolling mode] / Rechnoy transport (XXI vek) [River transport (XXI century)]. Moscow,



2016. – № 4. – P. 42–47. – ISSN 1729–4258.

6. Rossiyskaya Federatsiya. Min-vo prirodnikh resursov RF. Ob utverzhdenii metodiki gidrograficheskogo rayonirovaniya territorii Rossiyskoy Federatsii. Prikaz Min-va prirodnikh resursov RF ot 25.04.2007. № 112 : zaregistr. v Min-ve yustitsii RF 23 maya 2007 goda № 9538]. – URL: <https://base.garant.ru/12153715/?ysclid=ldttr5kc2p342158036>.

7. Metodika raschyota ponizheniya urovney vody pri dobyche nerudnykh stroitelnykh materialov [Methodology for calculating the lowering of water levels during extraction of non-metallic building materials] // M-vo rech. flota RSFSR, Gl. upr. portov; [i dr.]. – Moscow : Transport, 1984. – 21 p.

8. Chalov R. S. Ruslovye protsessy (ruslovedenie) [Riverbed processes (river morphology)]: ucheb. dlya studentov vysshikh uch. zavedeniy, obuch. po spetsial. 05.03.04, 05.04.04 "Gidrometeorologiya" i 05.03.02, 05.04.02 "Geografiya". – Moscow : INFRA-M, 2016. – 565 p. – ISBN 978-5-16-011036-3.

9. Gladkov G. L., Zhuravlyov M. V., Sokolov Yu. P. Otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu inzhenernykh meropriyatii na sudokhodnykh rekakh [Environmental impact assessment of engineering measures on navigable rivers]. – Saint-Petersburg : Izd-vo A. Kardanova, 2005. – 241 p. – ISBN 5-98175-008-1.

© В. В. Агеева, Д. А. Кожанов, Е. А. Люкина, М. А. Решетников, 2023

Получено: 28.12.2022 г.

УДК625.7/8:621.744

И. Н. РОХМИСТРОВ, магистрант кафедры гидротехнических и транспортных сооружений; **В. И. КОСТИН**, канд. техн. наук, доц. кафедры гидротехнических и транспортных сооружений

АКТУАЛИЗАЦИЯ УКРУПНЕННЫХ ЭЛЕМЕНТНЫХ НОРМ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА СПИРАЛЬНОВИТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ ТРУБ (СВМГТ) В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-42-89;
эл. почта: gs@nngasu.ru

Ключевые слова: спиральновитые металлические гофрированные трубы, укрупненные элементные нормы, продолжительность строительства.

Приведены методика обоснования и результаты расчета значений укрупненных элементных норм продолжительности устройства СВМГТ для условий дорожного строительства, полученные на основе натурального численного эксперимента.

Актуальность темы

В настоящее время применение спиральновитых металлических гофрированных труб является одним из наиболее распространенных и перспективных направлений решения вопросов поверхностного водоотвода при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог (см. рис. 1 цв. вклейки). СВМГТ отличаются своей технологичностью по скорости и удобству монтажа, долговечностью, нетребовательны к грунтово-гидрологическим и климатическим