

УДК 628.218

© Ван Дунлян, аспирант

© Л. Д. Терехов, д-р техн. наук, профессор
(Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: wangdongliang@yandex.ru, levter4@rambler.ru

© Е. Л. Терехова, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: eterekhova@lan.spbgasu.ru,

© Ш. Б. Майны, канд. техн. наук, доцент
(Тувинский государственный университет,
Кызыл, Россия)

E-mail: shonchikspb@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-5-59-66

© Wang Dongliang, post-graduate student

© L. D. Terekhov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: wangdongliang@yandex.ru, levter4@rambler.ru

© E. L. Terekhova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: eterekhova@lan.spbgasu.ru,

© Sh. B. Mayny, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Tuvan State University,
Kyzyl, Russia)

E-mail: shonchikspb@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ДЕФОРМИРОВАННОГО КАНАЛИЗАЦИОННОГО КОЛЛЕКТОРА С ЦЕЛЬЮ ОБОСНОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СИРП ДЛЯ ЕГО РЕМОНТА

NUMERICAL MODELING OF FLOW CAPACITY IN A DEFORMED SANITARY SEWER COLLECTOR TO SUBSTANTIATE THE USE OF THE CIPP METHOD FOR ITS REPAIR

Представлены данные текущего состояния канализационных сетей в г. Нанкине КНР. В результате частых землетрясений на участках канализационной сети чаще всего встречаются изломы продольного профиля. В качестве возможного метода восстановления предлагается применение метода СИРП. Для оценки эффективности восстановления участка сети с помощью метода СИРП определены гидравлические характеристики трубопровода в условиях нового профиля и выполнен конечно-элементный анализ деформированного участка коллектора. Целью исследования является определение влияния степени вертикальной деформации трубопровода на его гидравлические характеристики. Для оценки качества модельных расчетов использовались данные лабораторного эксперимента на масштабной модели коллектора, которые показали хорошую сходимость с модельными расчётами. Полученные результаты позволяют разработать рекомендации по применению метода СИРП при ремонте канализационных коллекторов с деформацией продольного профиля и повысить эффективность работы канализационной системы.

Ключевые слова: коллектор, деформация, моделирование, конечно-элементный анализ, СИРП.

This paper presents an assessment of the current condition of sanitary sewer systems in the city of Nanjing, China. As a result of frequent seismic activity, there are observed widespread longitudinal profile fractures across sewer network segments. The authors propose using the Cured-In-Place Pipe (CIPP) rehabilitation method as a viable repair solution. In order to evaluate the effectiveness of the of the network section repair using the CIPP method, the hydraulic characteristics of the pipeline were determined under the conditions of a new profile. Through the finite element analysis (FEA) there was determined the condition of the deformed collector sewer section. The purpose of the study is to determine the effect of the degree of vertical deformation of the pipeline on its hydraulic characteristics. To assess the quality of model calculations, data from a laboratory experiment on a scale model of the collector were used, which showed good convergence with computational results. The results obtained will make it possible to develop recommendations for the use of the CIPP method in the repair of sewers with longitudinal profile deformation and increase the efficiency of the sewer system.

Keywords: sewer collector, deformation, modeling, finite element analysis, CIPP.

Введение

Канализационные сети г. Нанкина КНР характеризуются высоким уровнем грунтовых вод, а также повышенной уязвимостью к землетрясениям и трещинам в грунте. Геологические особенности района способствуют распространению дефектов трубопроводов, таких как перемещение перегибов профиля труб вверх или вниз, смещение стыков и возникновение разрывов. В летний период в Нанкине наиболее часто происходят аварии, вызванные изломом труб в результате землетрясений, что негативно сказывается на пропускной способности трубопровода. В качестве фактора, влияющего на изменение расхода и степени заполнения при работе коллектора, рассматривается излом трубы, вызывающий формирование участков трубопровода с другим уклоном.

Статистический анализ встречающихся в исследуемом районе дефектов трубопроводов помимо разрывов и коррозии показал, что наибольшую долю составляют дефекты, представляющие собой перегиб профиля трубопровода [1, 2].

В отличие от разрывов трубы для ремонта трубопровода в случае излома может быть эффективен метод CIPP (технология Cured-In-Place Pipe — отверждаемая на месте труба) — инновационный метод восстановления трубопроводов, позволяющий заменять поврежденные трубы без проведения траншейных работ [3, 4]. На рис. 1 показано изменение сечения трубопровода вследствие его вертикальной деформации, которое привело к формированию гидрозатвора в зоне просадки (диаметр трубопровода: 500 мм, срок эксплуатации: 7 лет, глубина заложения: 1–4 м, длина дефектного участка: 42,05 м).

Однако для оценки целесообразности восстановления трубопровода данным методом необходимо произвести оценку пропускной способности коллектора в условиях нового профиля.

Методы

С помощью численного моделирования в программе конечно-элементного анализа выполнено обоснование дальнейшего применения бестраншейной технологии методом CIPP для трубопровода в случае изменения продольного профиля. Технология бестраншейного ремонта позволяет решать инженерные задачи при строительстве новых и реконструкции изношенных трубопроводов. Метод CIPP заключается в том, что пропитанный смолой шланг помещают в ремонтируемый участок трубы путем протягивания. После высыхания и отверждения шланг образует твердотельную структуру [5]. Использование данной технологии ремонта позволяет эффективно улучшить гидравлические характеристики трубопровода при наличии дефектов материала трубопровода, таких как утечки, разрывы, коррозия и т. д. Однако в случае излома профиля трубопровода может существенно измениться режим движения воды, что в свою очередь может вызывать заиливание и засорение коллектора.

Для изучения движения потока воды в трубопроводе с переломом использовалась модель, построенная в программе конечно-элементного анализа ANSYS FLUENT. На начальном этапе в программе осуществлялось



Рис. 1. Образование перегиба профиля трубопровода в г. Нанкине

построение геометрии расчетной области исследуемого коллектора. Диаметр трубопровода составлял 490 мм, а длина принималась равной 30 м. На обоих концах трубопровода располагались смотровые колодцы. Расчетная область смотрового колодца представляет собой цилиндрическую фигуру диаметром 1000 мм и высотой 1500 мм. Для имитации патрубков подключения к коллектору также были созданы расчетные области цилиндрической формы диаметром 490 мм, сориентированные в направлении оси X и подключенные к колодцу с обеих сторон (рис. 2, 3).

Для имитации шероховатости стенки трубопровода принимался коэффициент C_k , равный 0,5, который характеризует поверхность, имеющую однородное распределение неровностей одинакового размера. Высота самих неровностей принималась 0,0001905 м, что соответствует бетонной поверхности.

Для моделирования потока в качестве рабочей среды принималась вода с температурой 25 °С. По справочным данным принимался коэффициент кинематической вязкости воды, равный $1,31 \times 10^{-6}$ м²/с. Для оценки качества модельного расчета использовались данные лабораторного эксперимента на масштабной модели. Моделирование выполнялось для различного уклона и степени наполнения трубопровода.

Результаты

В табл. 1 представлены результаты моделирования для различных уклонов трубопровода и разной скорости входного потока. Эти результаты получены для трубы без деформации для оценки качества расчета.

На рис. 4 показан качественный результат расчета двухфазного поток воды и воздуха, формирующийся в коллекторе.

Для оценки качества моделирования выполнялся сравнительный анализ наполнения коллектора, полученный в результате расчета и с помощью лабораторного экспе-

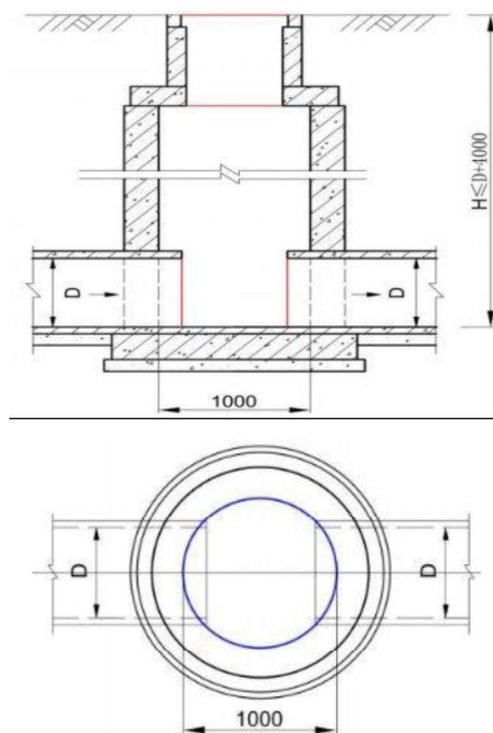


Рис. 2. Схема смотрового колодца на системе канализации

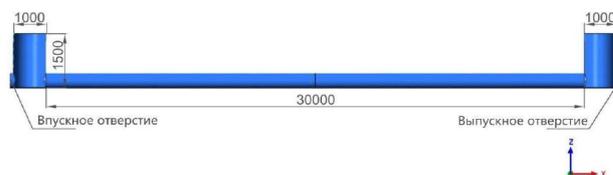


Рис. 3. Расчетная область модели канализационного коллектора

римента на масштабной установке. Масштаб лабораторной установки по сравнению с натурным объектом составлял 1 : 5. Участок реального канализационного коллектора имел длину 30 м. Для сравнения расчетного и лабораторного заполнений был намечен ряд живых сечений, положение которых для лабораторной установки определялось параметром X_1 — расстоянием от начала трубы в сантиметрах, а для математической модели параметром X_2 — расстоянием от входного граничного условия в метрах. В данных сечениях фиксировались глубины потока воды при физическом эксперименте — H_1 (м) и при модельном расчете — H_2 (м). В табл. 2

Таблица 1

Результаты моделирования трубопровода с различным уклоном по длине участка

№ п/п	Уклон лотка трубы, ‰	Степень заполнения h/d	Средняя скорость потока V , м/с	Интенсивность турбулентности I , %	Гидравлический диаметр, м
1	3	0,5	0,912	4,200	0,250
2	3	0,6	0,979	4,164	0,278
3	3	0,7	1,022	4,141	0,296
4	5	0,5	1,178	4,069	0,250
5	5	0,6	1,263	4,033	0,278
6	5	0,7	1,319	4,012	0,296
7	7	0,5	1,394	3,984	0,250
8	7	0,6	1,495	3,949	0,278
9	7	0,7	1,561	3,928	0,296
10	9	0,5	1,581	3,922	0,250
11	9	0,6	1,695	3,888	0,278
12	9	0,7	1,770	3,867	0,296



Рис. 4. Двухфазный поток в коллекторе

представлен сравнительный анализ глубин потока воды в точках измерения и масштабной конечно-элементной модели.

По результатам сравнения глубин можно заключить, что относительная погрешность между численным расчетом и измерениями масштабной модели незначительна, а степень соответствия высокая. Это подтверждает, что выбранные настройки модели позволяют получить достоверные результаты, качественно отражающие изучаемый процесс, и могут быть использованы для изучения гидравлического сопротивления деформированного коллектора и выработки рекомендаций по использованию метода восстановления СІРР [6].

Анализ гидравлических характеристик трубопровода в условиях вертикальной деформации

Для изучения влияния продольной деформации на характеристики потока были приняты следующие варианты степени вер-

Таблица 2

Сравнение глубин потока воды в соответствующих сечениях масштабной лабораторной модели и конечно-элементной модели

№ п/п	X_1 , см	X_2 , м	H_1 , м	H_2 , м	Относительная погрешность, %
1	30	1,5	0,280	0,275	1,82
2	60	3,0	0,311	0,304	2,30
3	90	4,5	0,330	0,326	1,23
4	120	6,0	0,340	0,343	-0,87
5	150	7,5	0,342	0,347	-1,44
6	180	9,0	0,349	0,352	-0,85
7	210	10,5	0,343	0,340	0,88
8	240	12,0	0,347	0,344	0,87
9	270	13,5	0,354	0,350	1,14
10	300	15,0	0,340	0,345	-1,45
11	330	16,5	0,347	0,344	0,87
12	360	18,0	0,346	0,341	1,47
13	390	19,5	0,347	0,343	1,17
14	420	21,0	0,340	0,345	-1,45
15	450	22,5	0,345	0,342	0,88
16	480	24,0	0,348	0,344	1,16
17	510	25,5	0,337	0,342	-1,46
18	540	27,0	0,340	0,343	-0,87
19	570	28,5	0,345	0,340	1,47
20	600	30,0	0,330	0,337	-2,08

тикального смещения трубы: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 %. На рис. 5 представлена геометрия расчетной области участка коллектора с вертикальным изменением положения трубы в 30 %, подлежащего ремонту.

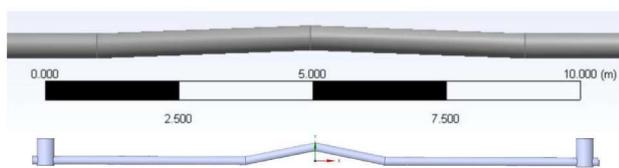


Рис. 5. Расчетная область участка коллектора с вертикальным изменением положения трубопровода

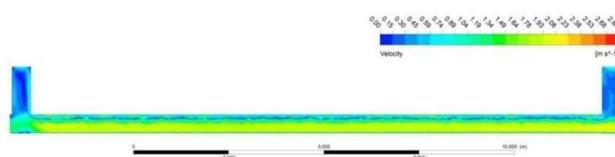


Рис. 6. График распределения скорости потока в коллекторе без деформации

Рассмотрим распределение скорости для варианта заполнения трубопровода $h/d = 0,7$ на входном сечении и уклоном 5 ‰. Ввиду большой протяженности трубопровода для лучшего отображения результатов расчета поле скорости на рисунках представлено в масштабе 1 : 2 в горизонтальной плоскости. На рис. 6 показано поле распределения скорости в трубопроводе с отсутствием деформации. Как видно на рисунке, практически по всей длине участка установилась одинаковая средняя скорость от 1,93 до 2,23 м/с. Максимальная скорость наблюдается на выходном граничном условии — 2,82 м/с. В трубопроводе формируется кривая спада, что соответствует ожиданиям, поскольку за пределами выходного граничного условия формируется условие свободно падающего потока.

На рис. 7 показан результат моделирования поля скорости для трубопровода с деформированным профилем для аналогичных условий, приведенных для трубопровода без перелома (см. рис. 6). В связи с изломом трубопровода участок трубопровода делится на две области с разным режимом движения потока. До излома средняя скорость ниже и составляет от 1,27 до 1,57 м/с. Перед изломом наблюдается кривая подпора. По распределению скоростей видно, что, подходя к излому,

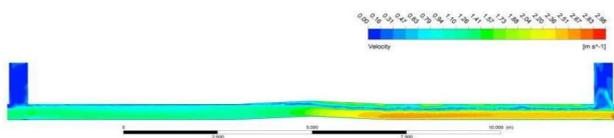


Рис. 7. График распределения скорости потока в коллекторе с деформацией

поток затормаживается. После прохождения верхней точки излома поток ускоряется и формируется кривая спада. Средняя скорость потока на этом участке увеличивается и составляет от 2,20 до 2,98 м/с. Фактически сформировавшийся перелом работает как водослив практического профиля.

На рис. 8 показаны графики изменения максимальной скорости потока, определенной на участке коллектора после наступления установившегося движения за 40 с после начала моделирования в зависимости от степени изменения кривизны и уклона коллектора. Снижение скорости потока наблюдается при вертикальном смещении (подъеме) трубопровода на 35 % и уклоне лотка 3 ‰. Для данного случая на рис. 9 показано поле распределения скоростей потока. Как видно, перед переломом формируется область существенно малых скоростей от 0,55 до 0,77 м/с. Снижение скорости в коллекторе может приводить к заливанию лотка коллектора и значительному уменьшению пропускной способности.

Оценка изменения касательного напряжения в зависимости от уклона и степени кривизны коллектора представлена на рис. 10. Перед восходящим участком из-за эффекта подпора воды скорость потока в трубопроводе снижается, что приводит к уменьшению касательного напряжения на внутренней стенке. Максимальное касательное напряжение наблюдается в нижней части нисходящего участка и постепенно уменьшается по направлению потока до граничного условия выхода потока.

Как видно из графика, при восстановлении трубопровода с восходящим измене-

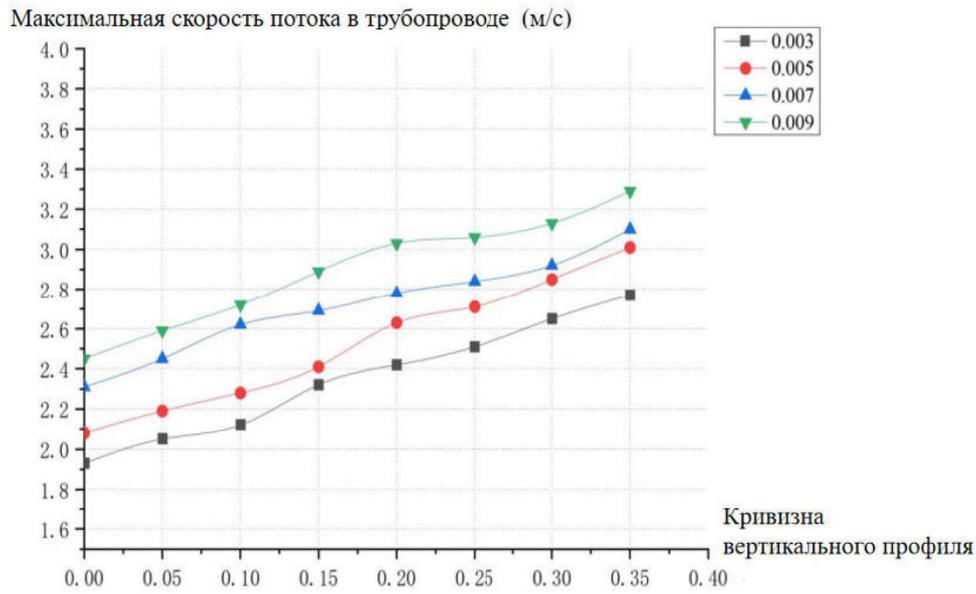


Рис. 8. График изменения максимальной скорости потока в трубопроводе в зависимости от уклона и степени кривизны (высоты перелома) при постоянном расходе ($h/d = 0,7$)

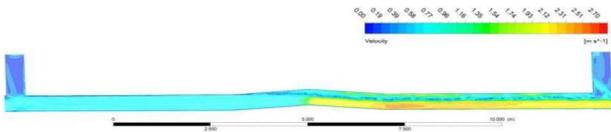


Рис. 9. График распределения скорости потока в коллекторе с деформацией при минимальном расходе

нием профиля трубопровода и одинаковым уклоном дна увеличение степени кривизны приводит к пропорциональному росту максимального касательного напряжения на внутренней стенке смоделированного участка.

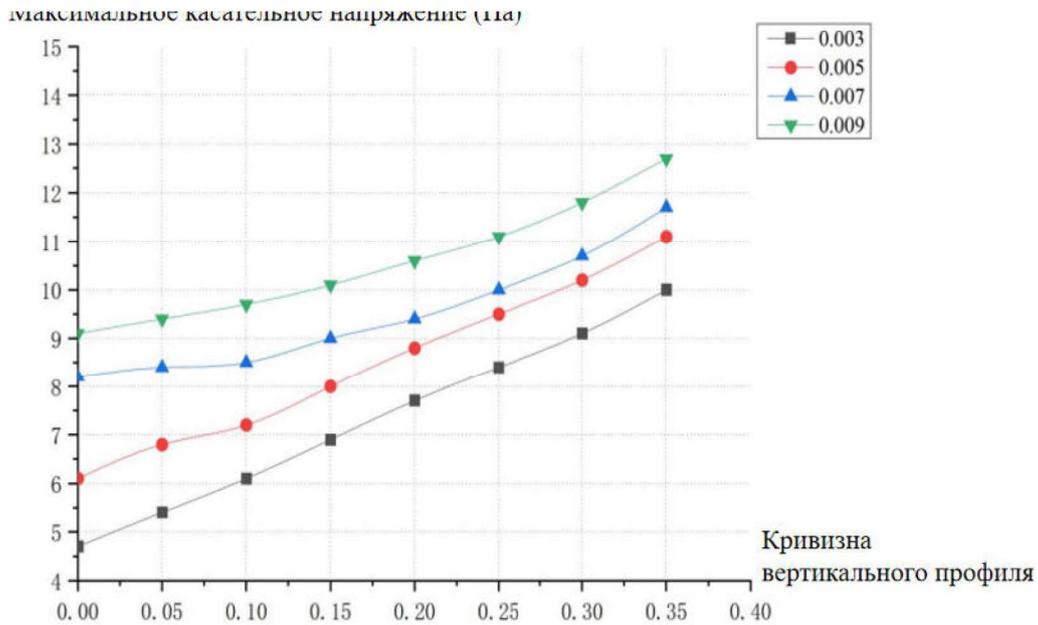


Рис. 10. График изменения максимального касательного напряжения на внутренней стенке трубопровода в зависимости от уклона и степени кривизны коллектора

Следует отметить, что длительное воздействие потока с большой скоростью (зона гидравлической эрозии) в зонах с изменением профиля может вызвать отслоение покрытия стенки или повторную деформацию стенки, вызывающую утечки в восстановленной методом СІРР трубе.

При различных рабочих режимах из-за практически одинаковой степени заполнения трубы поля распределения скорости получаются достаточно близкими по структуре. Наблюдается характерное распределение: максимальная скорость — в центре потока, минимальная — в пристенной зоне.

На основе полученных результатов распределения скоростных профилей на выходе установлено, что при одновременном наличии дефектов восходящего изменения профиля трубы различных размеров основное влияние на режим течения оказывают участки с наибольшей высотой излома. Поэтому при разработке проектов восстановления трубопроводов с использованием метода СІРР необходимо учитывать данные дефекты.

Выводы

В работе с помощью программы конечно-элементного анализа (ANSYS FLUENT) рассмотрен процесс протекания потока по коллектору с вертикальным изломом. Предлагаемая модель верифицирована с использованием данных лабораторного эксперимента. Для различных уклонов и заполнения трубопровода получено поле скорости. На основании результатов моделирования установлено, что средняя скорость потока через трубопровод зависит от высоты излома. Чем больше высота излома, тем больше средняя скорость потока.

Статистический анализ дефектов трубопроводов в районе обследования выявил, что возникновение перегибов профиля трубопроводов является наиболее распространенным типом функциональных дефектов труб.

Полученные результаты могут быть использованы для методических рекоменда-

ций в инженерной практике при разработке мероприятий по реконструкции поврежденных коллекторов методом СІРР.

Библиографический список

1. Захаров Ю. С. Определение параметров гибких полимерных рукавов, используемых при восстановлении самотечных канализационных трубопроводов. Опыт Германии // Вода Magazine. 2016. № 2 (102). С. 10–15.
2. Ли Ч., Терехова Е. Л. Исследование характеристик потока в аэротенке с использованием ANSYS Fluent // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 6 (107). С. 81–86. DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-6-81-86.
3. Хуан Вэньин. Современное состояние и перспективы развития материалов для бестраншейного ремонта трубопроводов // Новая промышленность материалов. 2016. № 3. С. 50–52.
4. Линь Минбо. Анализ результатов обследования канализационных сетей старого района Фучжоу и выбор технологий восстановления // Фуцзяньская архитектура. 2014. № 5. С. 59–62.
5. Ван Чжунчжу, Ли Тянь. Комплексный анализ затрат на традиционный и бестраншейный ремонт городских канализационных сетей // Журнал водоснабжения и водоотведения. 2008. № 6. С. 95–99.
6. Цао Цзинго, Чжан Вэньнин, Ши Дунъю и др. Экспериментальное исследование пропитки смолой и отверждения СІРР-футеровки при бестраншейной реабилитации городских дренажных каналов // Бестраншейные технологии. 2019. № 2. С. 62–66.

References

1. Zakharov Yu. S. *Opređenje parametrov gibkikh polimernykh rukavov, ispol'zuemykh pri vosstanovlenii samotechnykh kanalizatsionnykh truboprovodov. Opyt Germanii* [Determination of the parameters of flexible polymer sleeves used in the restoration of gravity sewer pipelines. Experience of Germany]. *Voda – Water*, 2016, no. 2 (102), pp. 10–15.
2. Li Ch., Terekhova E. L. *Issledovanie kharakteristik potoka v aerotenke s ispol'zovaniem ANSYS Fluent* [Study of flow characteristics in an aeration tank using ANSYS Fluent]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2024, no. 6 (107), pp. 81–86. DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-6-81-86.
3. Khuan Ven'in. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya materialov dlya bestransheynogo remonta truboprovodov* [Current status and development prospects of materials for trenchless repair of pipelines]. *Novaya*

promyshlennost' materialov – New materials industry, 2016, no. 3, pp. 50–52.

4. Lin' Minbo. *Analiz rezul'tatov obsledovaniya kanalizacionnykh setey starogo rayona Fuchzhou i vybor tekhnologiy vosstanovleniya* [Analysis of the survey results of Fujian old district sewer networks and the selection of restoration technologies]. *Futszyan'skaya arkhitektura – Fujian Architecture*, 2014, no. 5, pp. 59–62.

5. Van Chzhunchzhu, Li Tyan'. *Kompleksniy analiz zatrat na traditsionniy i bestransheyiny remont gorodskikh kanalizacionnykh setey* [Comprehensive analysis of the costs

of traditional and trenchless repair of urban sewer networks]. *Zhurnal vodosnabzheniya i vodootvedeniya – Journal of Water Supply and Sanitation*, 2008, no. 6, pp. 95–99.

6. Tsao Tszingo, Chzhan Ven'nin, Shi Dun'yu, et al. *Eksperimental'noe issledovanie propitki smoloy i otverzheniya CIPP-futerovki pri bestransheyinoy reabilitatsii gorodskikh drenazhnykh kanalov* [Experimental study of resin impregnation and curing of CIPP lining in trenchless rehabilitation of urban drainage canals]. *Bestransheyinye tekhnologii – Journal of Trenchless Technologies*, 2019, no. 2, pp. 62–66.