

Зависимость энергопотребления насосных агрегатов напорных коллекторов водоотведения от толщины слоя осадка на внутренней поверхности труб

Рецензия эксперта на статью получена 07.06.2022 [The expert review of the article received on June 7, 2022].

На основе длительного опыта эксплуатации трубопроводов водоснабжения и водоотведения установлено, что в процессе их жизненного цикла «эксплуатация» на внутренней поверхности напорных металлических сетей водоснабжения и на внутренних стенках напорных канализационных коллекторов образуется слой осадка, влияющий на величину значений фактических характеристик гидравлического потенциала трубопроводов — $N_{дв}^{\phi}$, v_{ϕ} и i_{ϕ} [1, 2, 5]. Следствием изменения значений этих характеристик, естественно, является изменение энергопотребления насосных агрегатов, установленных на канализационных насосных станциях (КНС), что снижает эффективность эксплуатации напорных коллекторов и приводит к изменению экономических показателей их эксплуатации [3, 4, 6–8].

На рис. 1 приведён фрагмент слоя отложений на внутренних стенках сетей водоснабжения и стенках напорных канализационных коллекторов.

В результате проведённых гидравлических исследований трубопроводов с внутренними отложениями подтверждено существование зависимостей фактического энергопотребления насосных агрегатов от значений величин фактического внутреннего диаметра труб $d_{вн}^{\phi}$ и фактической средней скорости потока $v_{ср}^{\phi}$, зависящих от значения толщины фактического (измеренного) слоя осадка σ на внутренней поверхности труб (рис. 1а).

Зависимость имеет вид [8]:

$$N_{дв}^{\phi} = f(d_{вн}^{\phi}, v_{ср}^{\phi}, i_{\phi}), \text{ кВт},$$

$$\text{или } i_{\phi} = f(N_{дв}^{\phi}, \sigma).$$

$$N_{дв}^{\phi} = 10^6 i_{\phi} (d_{вн}^{\phi})^2 v_{\phi} \frac{0,00808}{\eta}, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где i_{ϕ} , $d_{вн}^{\phi}$ и v_{ϕ} — значения фактических характеристик гидравлического потенциала труб со слоем внутренних отложений; η — величина КПД насосного агрегата по паспорту (для расчётов принимают $\eta = 0,7$ [10]).

Подтверждено существование зависимостей фактического энергопотребления насосных агрегатов от значений величин фактического внутреннего диаметра труб и фактической средней скорости потока

Значения параметров, входящих в зависимость (1), зависят в первую очередь от значения толщины фактического слоя осадка σ_{ϕ} на внутренней поверхности труб коллектора (рис. 1а), которая изменяется во времени в процессе его эксплуатации, а значит изменяется энергопотребление насосных агрегатов.

Формулы для расчёта значений $d_{вн}^{\phi}$, $v_{ср}^{\phi}$ и i_{ϕ} широко используются на практике и имеют следующий вид [2, 9]:

$$d_{вн}^{\phi} = (d_n - 2S_p) - 2\sigma_{\phi}, \text{ м}, \quad (2)$$

здесь d_n — наружный диаметр труб по ГОСТ из конкретного вида материала, м; S_p — толщина стенки трубы по ГОСТ, м; σ_{ϕ} — значение фактической (измеренной) толщины слоя осадка на внутренней поверхности трубы, м (рис. 1а):

$$\sigma_{\phi} = S_{\phi} - S_p, \text{ м}, \quad (3)$$

где S_{ϕ} — фактическая толщина стенки труб со слоем отложений, м.

Формулы (2) и (3) используются при расчёте значений $N_{дв}^{\phi}$ по формуле (1) [10].

УДК 628.22:532.5.013. Научная специальность: 05.23.04.

Зависимость энергопотребления насосных агрегатов напорных коллекторов водоотведения от толщины слоя осадка на внутренней поверхности труб

О.А. Продоус, д.т.н., профессор, ООО «ИНКО-эксперт» (г. Санкт-Петербург); П.П. Янубчик, к.т.н., профессор, кафедра «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика», [Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I \(ПГУПС\)](#); Д.И. Шлычков, [Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет \(НИУ МГСУ\)](#)

Целью работы является исследование влияния толщины слоя осадка на внутренней поверхности канализационных коллекторов на величину энергопотребления насосных агрегатов в процессе их эксплуатации. Проведены расчёты значений характеристик гидравлического потенциала стальных труб для конкретного примера. Рекомендовано в процессе эксплуатации канализационных коллекторов учитывать влияние толщины слоя осадка на внутренней поверхности труб для предотвращения роста энергопотребления насосных агрегатов. Подтверждается зависимость энергопотребления насосных агрегатов канализационных коллекторов от толщины слоя осадка на их внутренних стенках.

Ключевые слова: энергопотребление, напорные коллекторы, толщина слоя отложений, внутренняя поверхность труб.

UDC 628.22:532.5.013. The number of scientific specialty: 05.23.04.

Dependence of energy consumption of pumping units of pressure water manifolds on the thickness of the sediment layer on the inner surface of pipes

O. A. Prodous, Doctor of Technical Sciences, Professor, "INCO-expert", LLC (St. Petersburg city); P. P. Yakubchik, PhD, Professor, [Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University](#); D. I. Shlychkov, [Moscow State University of Civil Engineering \(National Research University\)](#)

The aim of the work is to study the influence of the thickness of the sediment layer on the inner surface of sewer collectors on the amount of energy consumption of pumping units during their operation. The values of the characteristics of the hydraulic potential of steel pipes were calculated for a specific example. It is recommended during the operation of sewer collectors to take into account the influence of the thickness of the sediment layer on the inner surface of the pipes to prevent an increase in the energy consumption of pumping units. The dependence of the energy consumption of pumping units of sewer collectors on the thickness of the sediment layer on their inner walls is confirmed.

Key words: energy consumption, pressure collectors, thickness of sediment layer, inner surface of pipes.

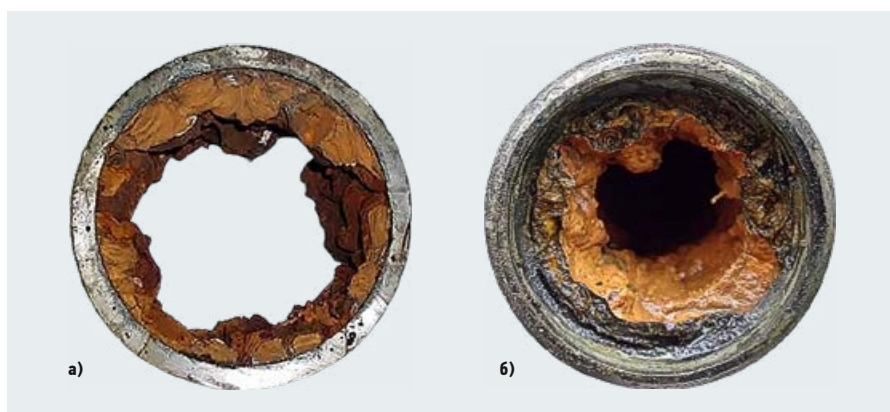


Рис. 1. Фрагменты отложений внутри различных трубопроводов (на внутренней поверхности: а — водопроводных сетей, б — напорных коллекторов)

Покажем на конкретном примере, как изменяется энергопотребление насосного агрегата при изменении фактической толщины слоя отложений $\sigma_{\text{ф}}$ на внутренней поверхности канализационного коллектора из стальных труб.

Условие задачи

По напорному коллектору диаметром $d_{\text{вн}} = 400$ мм из стальных электросварных труб по ГОСТ 10704–91 перекачивается расход сточной жидкости $q = 0,11$ м³/с (110 л/с). Толщина фактического (измеренного) слоя осадка на внутренних стенках труб составляет $\sigma = 30$ мм.

Необходимо рассчитать и сравнить значения энергопотребления насосного агрегата для новых стальных труб и труб со слоем отложений $\sigma = 30$ мм (0,03 м). Показать графически изменение энергозатрат насосного агрегата $N_{\text{дв}}$ при заданных условиях.

Покажем на примере, как изменяется энергопотребление насосного агрегата при изменении фактической толщины слоя отложений внутри стального канализационного коллектора

Результаты сравнения

табл. 1

Толщина слоя внутренних отложений σ , м	Характеристики гидравлического потенциала труб			Фактические энергозатраты насосного агрегата $N_{\text{дв}}^{\text{ф}}$, кВт·ч
	$d_{\text{вн}}^{\text{ф}}$, м	$v_{\text{ф}}$, м/с	$i_{\text{ф}}$, м/м	
0	0,3864	0,94	0,00325	5,264
0,005	0,3764	0,99	0,00373	6,045
0,010	0,3664	1,04	0,00427	6,880
0,020	0,3464	1,17	0,00581	9,413
0,030	0,3264	1,32	0,07226	117,268



Решение

1. По формуле (2) вычисляют значение фактического внутреннего диаметра $d_{\text{вн}}^{\text{ф}}$ для расчёта величины фактической скорости потока $v_{\text{ф}}$: $d_{\text{вн}}^{\text{ф}} = (0,4064 - 2 \times 0,01) - 2 \times 0,03 = 0,3264$ м.

2. Аналогично для новых стальных электросварных труб:

$$d_{\text{вн}} = 0,4064 - 2 \times 0,01 = 0,3864 \text{ м.}$$

3. Вычисляют значение средней скорости для новых труб и фактической средней скорости для труб со слоем осадка $\sigma = 0,03$ м:

$$v = \frac{4q}{\pi d_{\text{вн}}^2} = \frac{4 \times 0,11}{3,14 \times 0,3864^2} = 0,94 \text{ м/с;}$$

$$v_{\text{ф}} = \frac{4 \times 0,11}{3,14 \times 0,3264^2} = 1,32 \text{ м/с.}$$

4. Определяют значения потерь напора i (гидравлического уклона) на сопротивление по длине для новых труб и для труб со слоем отложений $\sigma = 0,03$ м. Для расчётов используют формулу профессора Ф. А. Шевелева, имеющую уточнённый авторами вид [9]. Для новых труб:

$$i = 0,00107 \frac{v^2}{(d_{\text{н}} - 2S_{\text{р}})^{1,3}}, \text{ м/м.} \quad (5)$$

для труб со слоем отложений σ :

$$i_{\text{ф}} = 0,00107 \frac{(v_{\text{ф}}^2)}{[(d_{\text{н}} - 2S_{\text{р}}) - 2\sigma]^{1,3}}, \text{ м/м;} \quad (6)$$

$$i = 0,00107 \times \frac{0,94^2}{(0,4064 - 2 \times 0,01)^{1,3}} =$$

$$= 0,00107 \times \frac{0,8836}{0,3864^{1,3}} = 0,00325 \text{ м/м;}$$

$$i_{\text{ф}} = 0,00107 \times \frac{1,32^2}{[(0,4064 - 2 \times 0,01) - 2 \times 0,03]^{1,3}} =$$

$$= 0,00107 \times \frac{1,7424}{0,3264^{1,3}} = 0,07226 \text{ м/м.}$$

5. По формуле (1) вычисляют величину энергозатрат насоса для новых стальных труб $N_{\text{дв}}$ и для труб со слоем осадка $N_{\text{дв}}^{\text{ф}}$:

$$N_{\text{дв}} = 10^6 \times 0,00325 \times 0,3864^2 \times 0,94 \times \frac{0,00808}{0,7} = 5,265 \text{ кВт·ч;}$$

$$N_{\text{дв}}^{\text{ф}} = 10^6 \times 0,07226 \times 0,3264^2 \times 1,32 \times \frac{0,00808}{0,7} = 117,268 \text{ кВт·ч.}$$

6. Фактические энергозатраты насосного агрегата $N_{\text{дв}}^{\text{ф}}$ в коллекторе со слоем осадка $\sigma = 0,03$ м возросли: $N_{\text{дв}}^{\text{ф}} > N_{\text{дв}}$ на 95,51 % или в 22,27 раза.

7. Для графической демонстрации изменяемых энергозатрат насосного агрегата $N_{\text{дв}}^{\text{ф}}$ в табл. 1 по описанной методике рассчитаны значения характеристик гидравлического потенциала новых стальных труб и труб с разной толщиной слоя отложений в диапазоне значений $\sigma < 0,03$ м.

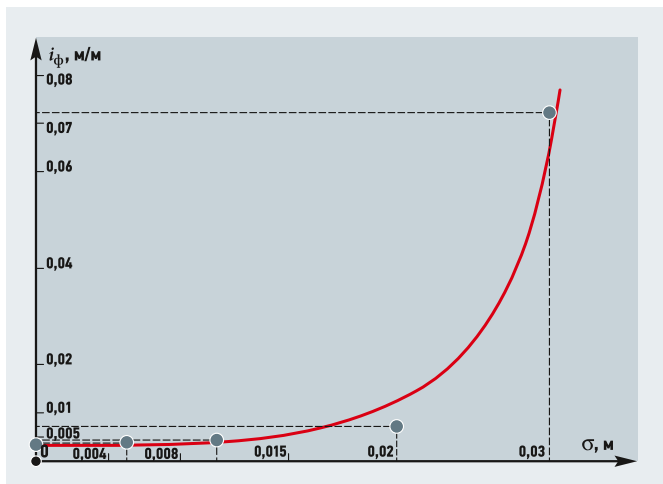


Рис. 2. Зависимость фактических потерь напора воды в трубопроводе от толщины слоя осадка на внутренней поверхности

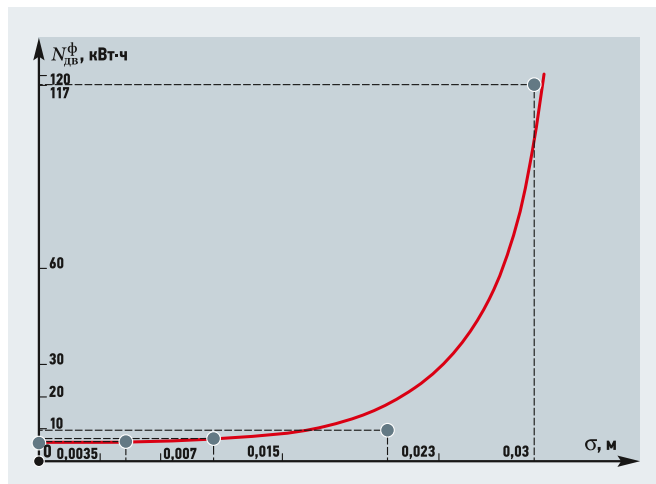


Рис. 3. Зависимость фактических энергозатрат насосного агрегата от толщины слоя осадка на внутренней поверхности

Результаты и их обсуждение

Сравнение значений гидравлических характеристик труб и характеристик энергозатрат насосных агрегатов $N_{дв}^ф$ с разной толщиной слоя внутренних отложений приведено в табл. 1. На рис. 2 по данным табл. 1 построен график зависимости $i_ф = f(σ)$, а на рис. 3 — график зависимости $N_{дв}^ф = f(σ)$, подтверждающие влияние толщины слоя осадка $σ$ на значение величины гидравлического уклона $i_ф$ и значение энергозатрат насосного агрегата, транспортирующего сточные воды.

Структура слоя осадка на внутренней поверхности напорных коллекторов из металлических труб изучена недостаточно. Требуется проведение специальных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для разработки мер, предотвращающих резкое изменение значений характеристик гидравлического потенциала труб

Анализ значений гидравлических характеристик коллектора, представленных в табл. 1, показывает, что:

1. С увеличением толщины слоя осадка $σ$ на внутренней поверхности канализационных коллекторов — резко изменяются значения фактических потерь напора $i_ф$ на сопротивление по длине. Для приведенного примера при изменении значений $σ$ в диапазоне от 0 до 30 мм (0,03 м) фактические потери напора $i_ф$ возрастают на 95,5 %: $i_{ф30} = 0,07226 \text{ м/м} > i_{ф0} = 0,00325 \text{ м/м}$ на 95 % или в 22,23 раза.
2. При этом (табл. 1) фактическое энергопотребление насосного агрегата на перекачку стоков по трубам с внутренними

отложениями для тех же условий также возрастает на 95,51 % или в 22,28 раза:

$$N_{дв}^ф = 117,268 \text{ кВт·ч} > N_{дв0} = 5,264 \text{ кВт·ч}.$$

3. Это свидетельствует о необходимости проведения постоянного контроля толщины слоя внутренних отложений $σ$ на стенках напорных коллекторов.

Заключение

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать следующее заключение:

1. Напорные коллекторы систем водоотведения из стальных труб и труб из серого чугуна, также как и водопроводные трубы из этих материалов, в процессе эксплуатации трубопроводов подвержены образованию на внутренней поверхности труб слоя осадка, влияющего на величину фактических значений характеристик их гидравлического потенциала ($i_{вн}^ф$, $v_ф$ и $i_ф$) и, в конечном итоге, на энергопотребление насосных агрегатов.
2. Структура слоя осадка на внутренней поверхности напорных коллекторов из металлических труб изучена недостаточно, поэтому требуется проведение специальных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для разработки мер, предотвращающих резкое изменение значений характеристик гидравлического потенциала труб с внутренними отложениями.
3. Требуется также разработка и обоснование величины предельных значений $σ$ для труб разного диаметра, при достижении которых дальнейшая эксплуатация напорных коллекторов с внутренними отложениями — недопустима.
4. Гидравлический расчёт напорных коллекторов из металлических труб с внутренними отложениями следует на данном этапе проводить с использованием

справочного пособия «Таблицы для гидравлического расчёта водопроводных труб из стали и серого чугуна с внутренними отложениями» [11], а после проведения исследований структуры слоя осадка $σ$ разработать уточнения к этим таблицам. ●

1. Водоснабжение и водоотведение на железнодорожном транспорте: учебник. Изд. 2-е / Под ред. В.С. Дикаревского. — М.: ДПО «УМЦ ЖДТ», 2009. 445 с.
2. Продоус О.А., Шлычков Д.И. Об изменении значений гидравлических характеристик напорных канализационных коллекторов из стальных и чугунных труб с внутренними отложениями // Известия вузов. Серия: Строительство, 2020. №12. С. 70–77.
3. Продоус О.А., Терехов Л.Д. Изменение энергозатрат насосов в зависимости от значений фактического внутреннего диаметра трубопроводов из напорных полиэтиленовых труб // Инженерные системы. АВОК Северо-Запад, 2020. №1. С. 36–42.
4. Продоус О.А. Технический аудит состояния городского водопровода и канализации для оценки их возможностей на перспективу // Трубопроводы и экология, 2011. №2. С. 14.
5. Пустовойт Б.В. Механика движения жидкостей в трубах. — Ленинград: Недра, 1971. 144 с.
6. Ботук Б.О., Фёдоров Н.Ф. Канализационные сети. Изд. 2-е. — М.: Стройиздат, 1976. 272 с.
7. Продоус О.А., Терехов Л.Д., Якубчик П.П., Черных А.С. Техническое регулирование значений гидравлических параметров неновых металлических труб для продления периода их использования // Известия ПГУПС. — СПб.: Изд-во ПГУПС, 2021. Т. 18. Вып. 3. С. 421–427.
8. Дикаревский В.С., Продоус О.А., Якубчик П.П., Смирнов Ю.А. Резервы экономии электроэнергии при транспортировании воды по водоводам из железобетонных труб / Рациональное использование воды и топливно-энергетических ресурсов в коммунальном водном хозяйстве: Тезисы докладов Всесоюз. науч.-техн. семинара (г. Алма-Ата, 6–8 августа 1985 г.). — М.: КСМ ВСНТО, 1985. С. 90–92.
9. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчёта водопроводных труб: справочное пособие. Изд. 11-е. — М.: Бастет, 2020. 428 с.
10. Рекомендации по реконструкции неновых металлических трубопроводов из стали и серого чугуна / Продоус О.А. и др. — СПб., М.: Своё издательство, 2021. 36 с.
11. Продоус О.А., Шипилов А.А., Якубчик П.П. Таблицы для гидравлического расчёта водопроводных труб из стали и серого чугуна с внутренними отложениями: справ. пособие. — СПб., М.: Перо, 2021. 238 с.

References — see page 78.

Dependence of energy consumption of pumping units of pressure water manifolds on the thickness of the sediment layer on the inner surface of pipes. Pp. 28–30.

Oleg A. Prodous, Doctor of Technical Sciences, Professor, "INCO-expert", LLC (St. Petersburg city); **Peter P. Yakubchik**, PhD, Professor, [Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University](#); **Dmitry I. Shlychkov**, [Moscow State University of Civil Engineering \(National Research University\)](#)

1. *Vodosnabzhenie i vodoотведение na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik* [Water supply and sanitation in railway transport: A textbook]. 2nd edition. Edited by V.S. Dikarevsky. Moscow. DPO "UMT's ZhDT" ["Training and Methodological Center for Education in Railway Transport" Federal State Budgetary Institution of Additional Professional Education]. 2009. 445 p. [In Russian]
2. O.A. Prodous, D.I. Shlychkov. *Ob izmenenii znachenij gidravlicheskih harakteristik napornykh kanalizatsionnykh kollektorov iz stal'nykh i chugunnykh trub s vnutrennimi otlozhenijami* [On the change in the values of the hydraulic characteristics of pressure sewer collectors made of steel and cast iron pipes with internal deposits]. *Izvestija vuzov. Seria: Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2020. No. 12. Pp. 70–77. [In Russian]
3. O.A. Prodous, L.D. Terehov. *Izmenenie jenergozatrata nasosov v zavisimosti ot znachenij fakticheskogo vnutrennego diametra truboprovodov iz napornykh polijetilenovykh trub* [Change in energy consumption of pumps depending on the values of the actual internal diameter of pipelines from pressure polyethylene pipes]. *Inzhenernye sistemy. AVOK Severo-Zapad* [Building systems. ABOK North-West]. 2020. No. 1. Pp. 36–42. [In Russian]
4. O.A. Prodous. *Tekhnicheskij audit sostojanija gorodskogo vodoprovoda i kanalizacii dlja ocenki ih vozmozhnostej na perspektivu* [Technical audit of the state of the city water supply and sewerage to assess their capabilities in the future]. *Truboprovody i jekologija* ["Pipelines and ecology" Magazine]. 2011. No. 2. Pp. 14. [In Russian]
5. B.V. Pustovojt. *Mehanika dvizhenija zhidkostej v trubah* [Mechanics of the movement of liquids in pipes]. Leningrad. Nedra ["Bowels of the Earth" Publishers]. 1971. 144 p. [In Russian]
6. B.O. Botuk, N.F. Fedorov. *Kanalizatsionnye seti* [Sewer networks]. 2nd edition. Moscow. Strojizdat [Publishing House of Literature on the Construction and Architecture ("Stroiizdat" Publishers)]. 1976. 272 p. [In Russian]
7. O.A. Prodous, L.D. Terehov, P.P. Jakubchik, A.S. Chernyh. *Tekhnicheskoe regulirovanie znachenij gidravlicheskih parametrov nenovykh metallicheskih trub dlja prodlenija perioda ih ispol'zovanija* [Technical regulation of the values of hydraulic parameters of non-new metal pipes to extend the period of their use]. *Izvestija PGUPS* [Bulletin of the St. Petersburg State University of Communications (SPbSUC)]. St. Petersburg. Izd-vo PGUPS [Publishing House of SPbSUC]. 2021. Vol. 18. Issue 3. Pp. 421–427. [In Russian]
8. V.S. Dikarevskij, O.A. Prodous, P.P. Jakubchik, Ju.A. Smirnov. *Rezervy jekonomii jelektronejergii pri transportirovanii vody po vodovodam iz zhelezobetonnykh trub* [Reserves for saving electricity when transporting water through conduits from reinforced concrete pipes]. *Racional'noe ispol'zovanie vody i toplivno-jenergeticheskikh resursov v kommunal'nom vodnom hozjajstve: Tezisy dokladov Vsesojuz. nauch.-tehn. seminarov* [Rational use of water and fuel and energy resources in municipal water management: Abstracts of the reports of the All-Union Scientific and Technical Seminar]. Alma-Ata. August 6–8, 1985. Moscow. KSM VSNTSO [All-Union Council of Scientific and Technical Societies of the USSR]. 1985. Pp. 90–92. [In Russian]
9. F.A. Shevelev, A.F. Shevelev. *Tablicy dlja gidravlicheskogo rascheta vodoprovodnykh trub: sprav. posobie* [Tables for the hydraulic calculation of water pipes: A reference guide]. 11th edition. Moscow. Bastet ["Bastet" Publishers]. 2020. 428 p. [In Russian]
10. O.A. Prodous et al. *Rekomendacii po rekonstrukcii nenovykh metallicheskih truboprovodov iz stali i serogo chuguna* [Recommendations for the reconstruction of non-new metal pipelines from steel and gray cast iron]. St. Petersburg, Moscow. Svoe izdatel'stvo ["An Own Publishing House" Publishers]. 2021. 36 p. [In Russian]
11. O.A. Prodous, A.A. Shipilov, P.P. Jakubchik. *Tablicy dlja gidravlicheskogo rascheta vodoprovodnykh trub iz stali i serogo chuguna s vnutrennimi otlozhenijami: sprav. posobie* [Tables for the hydraulic calculation of water pipes made of steel and gray cast iron with internal deposits: A reference guide]. St. Petersburg, Moscow. Pero ["A Nib" Publishers]. 2021. 238 p. [In Russian]