

**Анализ изменений эпюры скоростей в самотечных сетях водоотведения с разной толщиной слоя отложений в лотковой части труб**© Олег Александрович Продоус¹, Дмитрий Иванович Шлычков²,
Анна Александровна Малышева²¹ООО «ИНКО-эксперт», г. Санкт-Петербург, Россия²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, РоссияАвтор, ответственный за переписку: Шлычков Дмитрий Иванович, ShlyichkovDI@mgsu.ru

Аннотация. Практикой эксплуатации самотечных сетей водоотведения бытовых сточных вод установлено, что при определенных скоростях самотечного потока в лотковой части труб образуется осадок, влияющий на значения величин гидравлических характеристик потока, зависящих от фактической толщины слоя осадка в трубах. Целью исследования является установление эпюры распределения фактических значений скоростей течения сточной жидкости на вертикалях смоченного потока периметра труб с отложениями в их лотковой части. В работе используются расчетные зависимости, выведенные авторами для гидравлического расчета сетей водоотведения с внутренними отложениями. В результате исследования подтверждено на конкретном примере, что для бетонных труб диаметром 400 мм предельное значение толщины слоя осадка, препятствующее продолжению дальнейшей эксплуатации, составляет 0,08 м (80 мм). Показано, что с помощью графика распределения скоростей течения потока сточной жидкости по вертикалям можно определять уровень фактического наполнения в трубах, соответствующий конкретной толщине слоя осадка в них.

Ключевые слова: сети водоотведения, слой осадка, гидравлический расчет, эпюры распределения скоростей по сечению, внутренние отложения

Для цитирования: Продоус О. А., Шлычков Д. И., Малышева А. А. Анализ изменений эпюры скоростей в самотечных сетях водоотведения с разной толщиной слоя отложений в лотковой части труб // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 3. С. 368–373. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-3-368-373>.

Original article**Analysis of changes in the velocity diagram of gravity sewer networks with different thickness of sediment layer in the chute section of pipes****Oleg A. Prodous¹, Dmitry I. Shlyichkov², Anna A. Malysheva²**¹LLC "INCO-expert", Saint Petersburg, Russia²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, RussiaCorresponding author: Dmitry I. Shlyichkov, ShlyichkovDI@mgsu.ru

Abstract. The practice of operation of gravity sewer networks of domestic wastewater shows that sediment deposits are formed in the chute section of pipes at certain velocities of the gravity flow. These deposits affect the hydraulic characteristics of the flow, which depend on the actual thickness of the sediment layer in sewer pipes. In this study, a velocity diagram reflecting the distribution of actual velocity values of wastewater flow along the depth of the wetted perimeter of pipes with sediment deposits in their chute sections is established. To this end, the dependences derived by the authors previously for hydraulic calculation of drainage networks with internal sediments were used. It is confirmed on a specific example that the limiting value of sediment thickness preventing the continuation of further operation for concrete pipes with a diameter of 400 mm equals 80 mm. The obtained diagram of the vertical velocity distribution of sewage flow can be used to determine the actual pipeline fill level corresponding to the actual sediment layer thickness in sewer pipes.

Keywords: water disposal networks, sediment stratum, hydraulic analysis, plots of the velocity distribution over the cross section, internal deposits

For citation: Prodous O. A., Shlyichkov D. I., Malysheva A. A. Analysis of changes in the velocity diagram of gravity sewer networks with different thickness of sediment layer in the chute section of pipes. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(3):368-373. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-3-368-373>.

Введение

Введем понятие: эпюры скоростей в самотечной сети водоотведения – это график, характеризующий распределение скоростей течения жидкости на вертикалях смоченного потока периметра трубы. Авторами статьи установлено, что фактическая величина уровня наполнения труб H_{ϕ} , имеющих слой отложений осадка h в их лотковой части (рис. 1), является суммой значений [1]:

$$H_{\phi} = H_n + h, \text{ м} \quad (1)$$

где H_n – рекомендованный СП 32.13330.2012 уровень нормативного наполнения труб, м; h – толщина слоя осадка в лотковой части, м.

Из формулы (1) следует, что чем больше значение h , тем больше значение H_{ϕ} [2].

Покажем на примере изменение значений H_{ϕ} и $V_{\text{пр}}$ при разной толщине слоя осадка h в лотковой части труб.

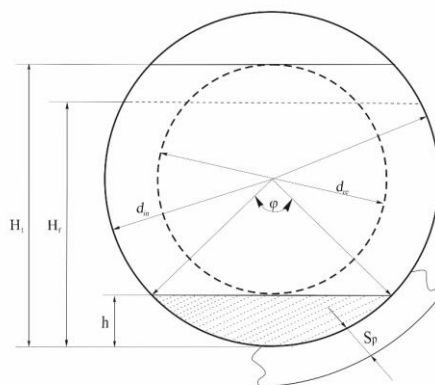


Рис. 1. Изменение фактического уровня наполнения H_{ϕ} в зависимости от толщины слоя осадка h
Fig. 1. Change in the actual level of replenishment H_{ϕ} depending on the thickness of the sediment layer h

В таблице приведены значения характеристик потока для условий следующей задачи.

Условия задачи

По бетонной трубе диаметром 400 мм (0,4 м) перемещается самотечный поток бытовых сточных вод $q = 150$ л/с (0,15 м³/с). Толщина слоя осадка в лотковой части $h = 100$ мм (0,1 м).

Рассчитать значения гидравлических характеристик потока, провести их анализ и построить эпюры скоростей для приведенных условий.

Решение

1. Площадь живого сечения (смоченный периметр) в трубе без отложений:

$$\omega = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4}, \text{ м}^2, \quad (2)$$

где $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр по ГОСТ, м.

2. Площадь живого сечения в трубе со слоем осадка $h = 0,1$ м:

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4}, \text{ м}^2, \quad (3)$$

$d_{\text{пр}}$ – приведенный диаметр трубы, м, определяется по формуле (рис. 1) [1]:

$$d_{\text{пр}} = \sqrt{d_n^2 - (d_{\text{вн}} - h)^2}, \text{ м}, \quad (4)$$

где d_n – наружный диаметр бетонной трубы по ГОСТ, м; $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы, м;

$$d_{\text{вн}} = d_n - 2S_p, \text{ м}, \quad (5)$$

где S_p – толщина стенки трубы по ГОСТ, м.

Площадь живого сечения $\omega_{\text{пр}}$ всегда больше значения площади ω , так как уровень фактического наполнения труб $H_{\phi} > H$ из-за наличия слоя осадка h в их лотковой части (рис. 1) [3].

$$\begin{aligned} \omega_{\text{пр}} &> \omega, \text{ м}^2; \\ H_{\phi} &> H, \text{ м}. \end{aligned}$$

3. Приведенная скорость потока в трубе со слоем осадка h :

$$V_{\text{пр}} = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot (d_{\text{пр}})^2}, \text{ м/с}. \quad (6)$$

4. Приведенный гидравлический уклон $i_{\text{пр}}$, м/м [2]:

$$i_{\text{пр}} = \frac{4 \cdot V_{\text{пр}}^2}{C^2 \cdot d_{\text{пр}}}, \text{ м/м}, \quad (7)$$

где C – коэффициент А. Шези, определяемый по формуле, уточненной акад. Н. Н. Павловским [1, 2]:

$$C = \frac{R_{\text{пр}}^{1/6}}{n}. \quad (8)$$

По данным таблицы на рис. 2 показано изменение профиля эпюры скоростей в бетонной трубе диаметром 400 мм.

По данным таблицы на рис. 3 построен график зависимости $i_{\text{пр}} = f(V_{\text{пр}})$, свидетельствующий об изменении значений гидравлического

уклона $i_{\text{пр}}$ в трубах с разной толщиной слоя осадка h в их лотковой части и влияющий на распределение скоростей потока на вертикалях смоченного периметра (эпюры скоростей) [4].

При этом фактические значения гидравлического уклона $i_{\text{пр}}$ изменяются в диапазоне значений от $i_{\text{пр}} = 0,00765$ м/м ($h = 0,05$ м) до $i_{\text{пр}} = 0,00538$ м/м ($h = 0,08$ м), то есть на 29,67 %, или в 1,42 раза, а приведенные скорости $V_{\text{пр}}$ (см. таблицу) на 12,32 %, или в 1,14 раза.

Изменение значений гидравлических параметров труб при разной толщине слоя осадка h
Changing the values of hydraulic parameters of pipes with different thickness of the sediment layer h

Толщина слоя осадка h , м	Уровень фактического наполнения труб $H_{\text{ф}}$, м	Приведенный диаметр труб, $d_{\text{пр}}$, м	Приведенная скорость $V_{\text{пр}}$, м/с	Коэффициент А. Шези $C_{\text{пр}}$	Фактический гидравлический уклон $i_{\text{пр}}$, м/м
0	0,280	0,318	1,89	51,27	0,01709
0,05	0,330	0,372	1,38	51,74	0,00765
0,06	0,340	0,381	1,32	51,95	0,00678
0,07	0,350	0,390	1,26	52,15	0,00599
0,08	0,360	0,398	1,21	52,32	0,00538
0,09	0,370	Нерасчетные, так как труба работает полным сечением (СП 32.13330.2012)			

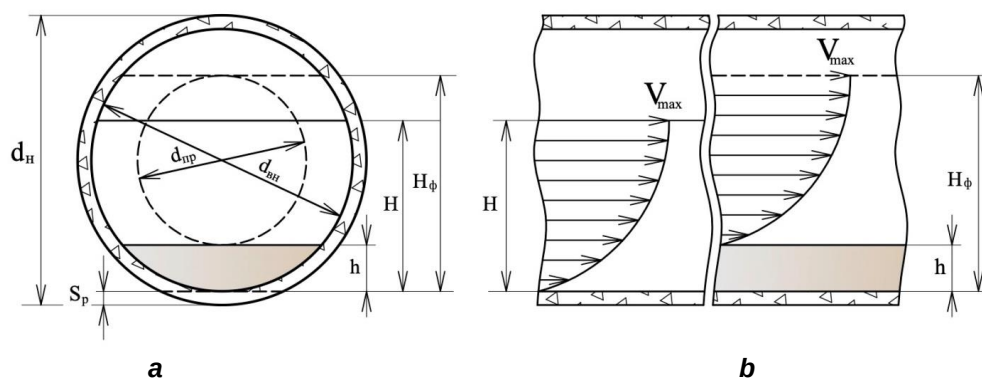


Рис. 2. Изменение профиля эпюры скоростей: а – в трубе без слоя осадка; б – с толщиной слоя осадка h

Fig. 2. Changing the velocity plot profile: а – in a pipe without a sediment layer; б – with a sediment layer thickness h

График, приведенный на рис. 3, подтверждает существование зависимости $i_{\text{пр}} = f(V_{\text{пр}})$ для труб с отложениями в их лотковой части, то есть свидетельствует об изменении эпюры распределения скоростей потока на вертикалях их смоченного периметра [5–7].

Заключение

Анализ изменения эпюры скоростей в новой бетонной трубе и трубе с отложениями в их

лотковой части для приведенного примера позволяет сделать следующие выводы:

- Изменение толщины слоя осадка h в лотковой части труб вызывает изменение скоростного режима потока, характеризуемого значениями приведенных скоростей $V_{\text{пр}}$, зависящих от толщины слоя осадка h [8, 9].

- При толщине слоя осадка $h = 0,05$ м (см. таблицу) приведенная скорость потока

$V_{пр} = 1,38$ м/с, а при $h = 0,08$ м она составляет $V_{пр} = 1,21$ м/с. То есть в диапазоне значений $h = 0,05 \div 0,08$ м $V_{пр}$ изменяется на 12,32 %, или в 1,14 раза. Это также свидетельствует об изменении эпюры распределения скоростей на вертикалях смоченного периметра трубы (рис. 2) [10, 11].

• Уровень фактического наполнения труб $H_{ф}$ также зависит от толщины слоя осадка h и для приведенного примера изменяется в диапазоне значений от $H_{ф} = 0,330$ м (при $h = 0,05$ м) до

$H_{ф} = 0,360$ м (при $h = 0,08$ м), то есть изменяется на 37,5 %, или в 1,6 раза.

• При толщине слоя осадка $h = 0,09$ м ($H_{ф} = 0,370$ м) дальнейшая эксплуатация сети водоотведения недопустима, так как трубы уже работают полным сечением, что нарушает требования СП 32.13330.2012, так как степень их фактического наполнения $\frac{H_{ф}}{d_{пр}} = 0,9$ превышает нормативную $\frac{H}{d_{вн}} = 0,7$ [12, 13].

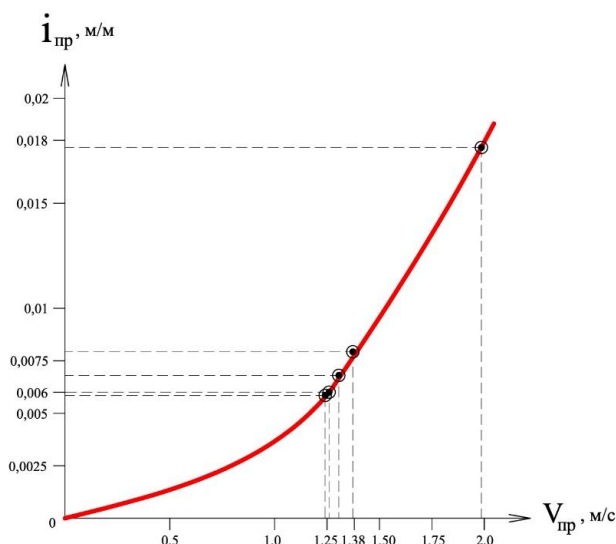


Рис. 3. График зависимости $i_{пр} = f(V_{пр})$
Fig. 3. Graph of dependence $i_{пр} = f(V_{пр})$

Таким образом, нормативная степень наполнения труб диаметром 400 мм $\frac{H}{d_{вн}} = 0,7$ не может быть больше значения $\frac{H_{ф}}{d_{пр}} = 0,9$. Поэтому для труб диаметром 400 мм она не должна превышать значения нормативной степени наполнения труб в диапазоне значений [14]:

$$0,7 \leq \frac{H_{ф}}{d_{пр}} \leq 0,9.$$

То есть фактическая степень наполнения труб с отложениями в их лотковой части может изменяться лишь на величину значения в 12,9 %, или в 1,29 раза.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Продоус О. А., Шлычков Д. И., Абросимова И. А. Обоснование необходимости проведения гидродинамической очистки самотечных сетей водоотведения // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 1. С. 106–114. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.1.106-114>.
2. Шлычков Д. И. Уточненная формула А. Шези для гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб // Сборник докладов участников интеллектуального марафона в области водоснабжения и водоотведения среди молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Москва, 09 сентября 2021 г.). М., 2021. С. 56–60.
3. Продоус О. А., Шлычков Д. И., Абросимова И. А. Допустимый уровень наполнения в трубах самотечных сетей водоотведения с внутренними отложениями // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 8. С. 1064–1072. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.8.1064-1072>.
4. Prodous O. A., Shlychkov D. I. Recommended dependence for hydraulic calculation of gravity drainage networks in order to improve the ecological well-being of cities // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). 2021. Vol. 937. p. 042021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/4/042021>.
5. Чупин Р. В. Оптимизация развивающихся систем водоотведения: монография. Иркутск:

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2015. 417 с.

6. Абрамович И. А. Повышение достоверности расчета сетей водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 1985. № 3. С. 4–5.

7. Добромислов А. Я. Гидравлический расчет безнапорных трубопроводов // Трубопроводы и экология. 2000. № 2. С. 21–24.

8. Продоус О. А., Шлычков Д. И., Пархоменко С. В. Необходимость разработки таблиц для гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и Архитектура. 2022. № 2 (87). С. 107–114.

9. Яковлев С. В., Калицун В. И. Самоочищение канализационной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 1970. № 7. С. 4–7.

10. Чупин В. Р., Мелехов Е. С., Чупин Р. В. Развитие методики гидравлических расчетов систем водоотведения // Вода и экология: проблемы и решения. 2010. № 1-2. С. 48–58.

11. Продоус О. А., Якубчик П. П., Шлычков Д. И. Зависимость энергопотребления насосных агрегатов напорных коллекторов водоотведения от толщины слоя осадка на внутренней поверхности труб // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2022. № 5 (254). С. 28–30.

12. Продоус О. А., Шлычков Д. И. Механизм образования слоя отложений в лотковой части труб самотечных сетей водоотведения // Известия вузов. Строительство. № 6 (750). 2021. С. 95–100.

13. Калинин А. В. Влияние отложений загрязнений в коллекторе водоотведения на изменение формы эпюры // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2012. № 3 (7). С. 52–58.

14. Продоус О. А., Малышева А. А., Абросимова И. А., Челоненко А. Г. Особенности гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения с внутренними отложениями // Вестник ТГАСУ. 2022. Т. 24. № 3. С. 173–179. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2022-24-3-173-179>.

REFERENCES

1. Prodous OA, Shlychov DI, Abrosimova IA. Justification of the need for the hydrodynamic cleaning of gravity water discharge networks. *Vestnik MGSU*. 2022;17(1):106-114. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.1.106-114>.

2. Shlychov DI. Refined formula by A. Chezy for hydraulic calculation of gravity sewerage networks with deposits in the tray part of pipes. *Sbornik dokladov uchastnikov intellektual'nogo marafona v oblasti vodosnabzheniya i vodootvedeniya sredi molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* (Moscow, 09th September 2021). Moscow, 2021. p. 56-60. (In Russ.).

3. Prodous OA, Shlychov DI, Abrosimova IA. Permissible filling level in pipes of gravity sewerage networks with internal deposits. *Vestnik MGSU*. 2022;17(8):1064-1072. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.8.1064-1072>.

4. Prodous OA, Shlychov DI. Recommended dependence for hydraulic calculation of gravity drainage networks in order to improve the ecological well-being of cities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES)*. 2021;937:042021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/4/042021>.

5. Chupin RV. Optimization of developing water disposal systems: monograph. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2015. 418 p. (In Russ.).

6. Abramovich IA. Improving the reliability of the calculation of sewerage networks.

Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique. 1985;3:4-5. (In Russ.).

7. Dobromyslov AY. Hydraulic calculation of non-pressure pipelines. *Truboprovody i ekologiya*. 2000;2:21-24. (In Russ.).

8. Prodous OA, Shlychov DI, Parkhomenko SV. The need to develop tables for hydraulic calculation of gravity-flowed water drainage networks with deposit in the tray part of the pipes. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i Arkhitektura*. 2022;2(87):107-114. (In Russ.).

9. Yakovlev SV, Kalitsun VI. Self-cleaning sewer network. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 1970;7:4-7. (In Russ.).

10. Chupin VR, Melekhov ES, Chupin RV. Development of methods for hydraulic calculations of wastewater systems. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. 2010;1-2:48-58. (In Russ.).

11. Prodous OA, Yakubchik PP, Shlychov DI. Dependence of the energy consumption of pumping units of pressure sewage collectors on the thickness of the sediment layer on the inner surface of the pipes. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie*. 2022;5(254):28-30. (In Russ.).

12. Prodous OA, Shlychov DI. The mechanism of formation of a layer of deposits in the tray part of pipes of gravity sewerage networks. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2021;6(750):95-100. (In Russ.).

13. Kalinin AV. Pollutants' concentration influence on the shape of averaged two-phase flow velocity diagram. *Vestnik SGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2012;3(7):52-58. (In Russ.).
14. Prodous OA, Malysheva AA, Abrosimova IA, Chelonenko AG. Hydraulic analysis of gravity flow

water distribution with internal deposits. *Vestnik TGASU = Journal of Construction and Architecture*. 2022;24(3):173-179. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31675/1607-1859-2022-24-3-173-179>.

Информация об авторах

О. А. Продоус,

доктор технических наук,
профессор, генеральный директор,
ООО «ИНКО-эксперт»,
190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр.,
37/1, лит. А, Россия,
e-mail: pro@enco.su
<https://orcid.org/0000-0003-0389-3695>

Д. И. Шлычков,

кандидат технических наук, доцент кафедры
водоснабжения и водоотведения,
Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет,
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26,
Россия,
e-mail: ShlyichkovDI@mgsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0210-2695>

А. А. Малышева,

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры теплогазоснабжения и вентиляции,
Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет,
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26,
Россия,
e-mail: MalyshevaAA@mgsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1026-9292>

Information about the authors

Oleg A. Prodous,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director,
INCO-Expert LLC,
37/1, letter A, Moskovskii Ave.,
Saint Petersburg, 190005, Russia,
e-mail: pro@enco.su
<https://orcid.org/0000-0003-0389-3695>

Dmitry I. Shlyichkov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the
Department of Water Supply and Sanitation,
Moscow State University of Civil Engineering
(National Research University),
26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337,
Russia,
e-mail: ShlyichkovDI@mgsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0210-2695>

Anna A. Malysheva,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Heat
and Gas Supply and Ventilation,
Moscow State University of Civil Engineering
(National Research University),
26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337,
Russia,
e-mail: MalyshevaAA@mgsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1026-9292>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Шлычков Д. И. несет ответственность за плагиат.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article. Shlyichkov D. I. bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Статья поступила в редакцию 04.08.2022.
Одобрена после рецензирования 24.08.2022.
Принята к публикации 25.08.2022.

The article was submitted 04.08.2022.
Approved after reviewing 24.08.2022.
Accepted for publication 25.08.2022.