

Известия вузов. Строительство. 2022. № 7. С. 18–25.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (7): 18–25.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 624.075.2.014.2

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-763-7-18-25

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЖЕСТКОСТИ ЗАЩЕМЛЕНИЯ СТОЙКИ В Т-ОБРАЗНОМ УЗЛЕ БЕСФАСОНОЧНОЙ ФЕРМЫ ИЗ КРУГЛЫХ ТРУБ

Андрей Александрович Кользееев, Владимир Дмитриевич Ворожейкин
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин), Новосибирск, Россия

Аннотация. Выполнена оценка жесткости защемления стойки решетки в Т-образном узле бесфасонной фермы из круглых труб. Исследование проведено численным методом с использованием программного комплекса Ansys. Уточнены параметры, влияющие на величину защемления. Использование результатов позволит повысить надежность расчетов стержней решетки и уточнить коэффициенты расчетной длины.

Ключевые слова: сжатый стержень, круглая труба, коэффициенты расчетной длины

Для цитирования: Кользееев А.А., Ворожейкин В.Д. Расчетная оценка жесткости защемления стойки в Т-образном узле бесфасонной фермы из круглых труб // Известия вузов. Строительство. 2022. № 7. С. 18–25. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-763-7-18-25.

Original article

ESTIMATED EVALUATION OF THE PINCHING STIFFNESS OF THE BAR IN THE T-SHAPED NODE OF THE TRUSS WITHOUT PLATES MADE OF ROUND PIPES

Andrei A. Kolzeyev, Vladimir D. Vorozheykin
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin),
Novosibirsk, Russia

Abstract. Evaluation of the pinching rigidity bar of the lattice in the T-shaped node of a truss without plates from round pipes was made. The study was carried out by a numerical method using the Ansys software package. The parameters that affect the amount of pinching have been refined. The use of the results will improve the reliability of calculations of lattice rods and refine the effective length coefficients.

Keywords: compressed rod, round pipe, effective length coefficients

For citation: Kolzeyev A.A., Vorozheykin V.D. Estimated evaluation of the pinching stiffness of the bar in the T-shaped node of the truss without plates made of round pipes. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2022; (7): 18–25. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-763-7-18-25.

Достоинства металлических конструкций различного назначения, в том числе бесфасоночных ферм со стержнями замкнутого (трубчатого) поперечного сечения, подробно рассмотрены в [1, 2]. Дополнительной экономии металла в таких фермах можно добиться за счет правильного учета защемления стержней решетки в поясах.

Фермы любой конструкции, и бесфасоночные, и с фасонками, имеют весьма жесткое сопряжение стержней в узлах в плоскости фермы. Классические фермы со стержнями из двух прокатных уголков, сваренных в тавр на фасонках, были исследованы еще в 1938 г. С.Н. Никифоровым [3]. На основе этих исследований в нормы (НиТУ 121–55) был введен коэффициент расчетной длины $\mu = 0,8$ для второстепенных сжатых стержней решетки (в плоскости фермы). Этот коэффициент применялся в нормативных документах многие годы и применяется в действующих нормах (СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции»).

Исследования, проведенные в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко [4], показали, что стержни решетки бесфасоночных ферм из круглых труб также защемлены в поясах, причем их расчетная длина меньше геометрической как в плоскости, так и из плоскости фермы. Результаты этих исследований были учтены в нормах (СНиП II-23-81* «Стальные конструкции»).

Коэффициенты расчетной длины ($\mu_x = 0,9$ – в плоскости фермы и $\mu_y = 0,9$ – из плоскости фермы) приняты для второстепенных сжатых стержней решетки, прикрепленных к поясам «впритык». Эти коэффициенты приняты независящими от каких-либо параметров.

В НГАСУ (Сибстрин) подробно изучена работа Т-образных узлов ферм из прямоугольных сварных труб из двух прокатных уголков при непосредственном примыкании стержней решетки к поясам [5]. В таких узлах стержни решетки защемляются внутренними гранями поясов. Установлено, что в поясах в зоне Т-образного узла рано появляются пластические деформации, а его несущая способность зависит от двух параметров: $\theta = b_c/b_f$ и $v = t_f/b_f$, где b_c и b_f – соответственно ширина стержня решетки и пояса, а t_f – толщина пояса. Работа такого узла существенно характеризуется зависимостью прогиба внутренней грани пояса от усилия в примыкающей стойке.

Результаты этих исследований были подтверждены экспериментально на моделях стоек из сварных труб длиной 3 м с Т-образными узлами [6]. Установлено, что прогиб внутренней грани поясной трубы под стойкой действительно является функцией θ и v , причем основное влияние оказывает параметр θ . Влияние параметра v незначительно: при увеличении толщины стенки поясной трубы в 1,7 раза критическая сила повышается всего на 5 %.

Коэффициенты расчетной длины для стержней решетки ферм из прямоугольных труб, сваренных из двух уголков, также были вычислены в НГАСУ (Сибстрин) [6]. Установлено, что жесткость защемления и коэффициенты расчетной длины для стержней решетки зависят от параметров θ и v .

В связи с этим возникают вопросы:

1. Насколько достоверны коэффициенты расчетной длины $\mu_x = 0,9$ и $\mu_y = 0,9$ для бесфасоночных ферм из круглых труб?

2. Зависит ли жесткость защемления стержней решетки от соотношения диаметра раскоса D_d и диаметра пояса D_f – $\theta = D_d/D_f$ и от отношения толщины стенки поясной трубы к диаметру пояса – $v = t_f/D_f$?

Для ответов на эти вопросы на кафедре металлических и деревянных конструкций НГАСУ (Сибстрин) были проведены численные исследования моделей сжатых стержней решетки ферм из круглых труб с помощью программного комплекса Ansys.

Зашемление стержня означает, что при изгибе под действием нагрузки в концевых сечениях возникают реактивные изгибающие моменты, которые препятствуют свободному повороту. Жесткость защемления можно определить как величину реактивного момента, возникающего при повороте узла на единичный угол [7].

От концевых защемлений зависит расчетная длина стержня l_{ef} , которую при работе в упругопластической стадии можно определять как расстояние между точками перегиба изогнутой оси стержня в предельном состоянии равновесия [8].

В качестве модели принят Т-образный узел сопряжения стойки с поясом (рис. 1). Модель такого типа была подробно исследована в [5], и это позволит сравнить результаты аналогичных узлов ферм из круглых и сварных труб из двух прокатных уголков. Возможно, в К-образных и других типах узлов ферм будут некоторые отличия от Т-образных, но это тема отдельных исследований. Также следует отметить, что наиболее правильный, но и наиболее сложный подход – численное исследование конструкции фермы в целом.

Размеры исследуемой модели приняты на основе [5]. Диаметр поясной трубы $D_f = 219$ мм, толщина стенки $t_f = 5–10$ мм. Диаметр стойки D_c варьи-

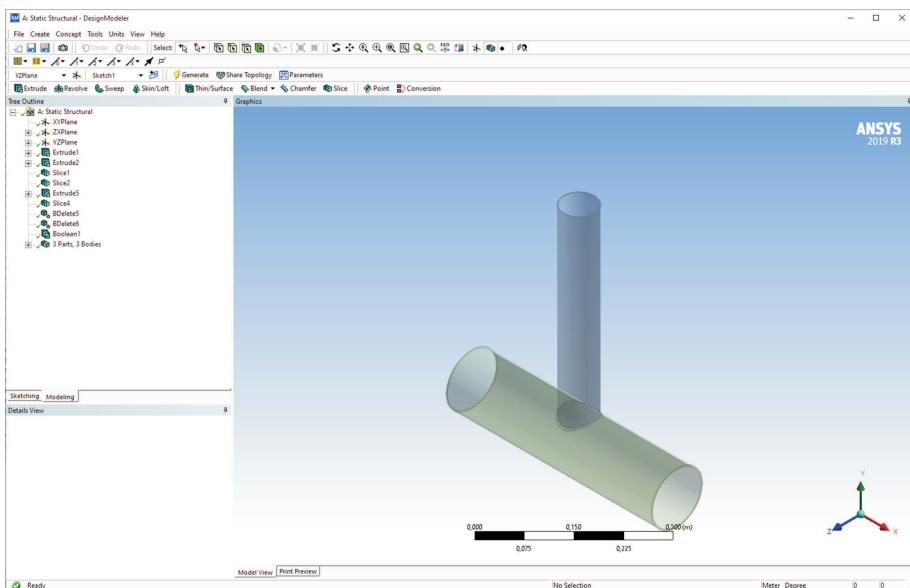


Рис. 1. Расчетная схема модели

Fig. 1. Calculation scheme of the model

ровался от 89 до 193 мм. Под величиной θ для данной модели понимается отношение диаметра трубы стойки к диаметру трубы пояса по наружным граням $\theta = D_c/D_f$; для v – это отношение толщины стенки трубы пояса к ее диаметру $v = t_f/D_f$.

Рассматриваемые интервалы варьирования: $\theta = 0,4\text{--}0,9$; $v = 1/20\text{--}1/50$.

Интервал для параметра θ выбран с учетом меньшей нагруженности второстепенных стержней решетки в сравнении с поясками. Материал моделей – малоуглеродистая сталь марки С255 ($R_y = 240$ МПа).

С целью оценки концевых защемлений проанализируем возможные перемещения торца элемента решетки (стойки) в узле сопряжения с поясом (см. рис. 1). Теоретически возможны три линейных перемещения и три угла поворота торца стойки относительно осей координат. Однако линейные перемещения в направлении осей X (вдоль оси пояса) и Z (из плоскости фермы) и угол поворота относительно оси Y (оси стойки) можно принять равными нулю, вследствие значительной жесткости внутренней грани пояса, которая работает в данных условиях как оболочка, защемленная по контуру, а также вследствие наличия распорок по поясам ферм покрытия.

Таким образом, в узле бесфасоночной фермы торец стойки может иметь линейное перемещение вдоль оси Y и два угловых перемещения относительно осей X и Z . В настоящем исследовании нагружение пояса (растяжение или сжатие) не рассматривалось. Влияние знака и величины усилий в поясе – это задача будущего исследования фермы как единой конструкции.

Для установления жесткости защемления стойки в поясах как вариант можно определить перемещение концевого сечения от соответствующего единичного силового воздействия [9]. Это перемещение характеризует податливость узла, а величина, обратная податливости, является жесткостью соответствующей связи [9].

Характеристики защемления концов стержня – жесткости в отношении поворота c и продавливания внутренней грани пояса r в зависимости от факторов θ и v оценивались с помощью системы конечно-элементного анализа Ansys, модуль Static Structure.

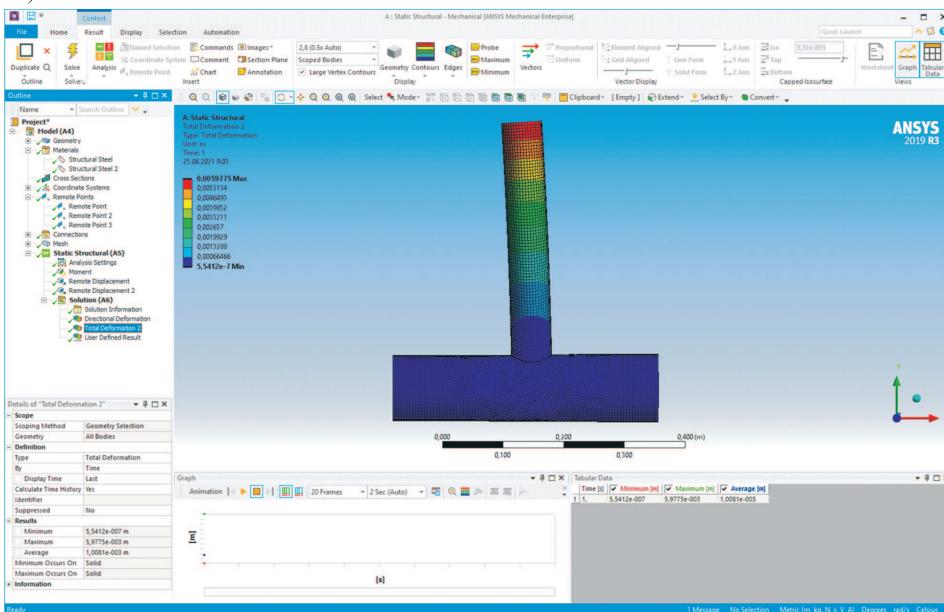
Вначале создавалась геометрия узла. Далее задавались граничные условия, и к стойке прикладывался единичный момент или единичная сила. Сам узел разбивался сеткой конечных элементов со стороной 5 мм (рис. 2).

По полученным результатам перемещений узлов сетки (см. рис. 2) определяется угловая податливость Т-образного узла сопряжения φ_f . Жесткость защемления вычисляется как величина, обратная податливости: $c = 1/\varphi_f$.

На рис. 3, *a* даны сравнительные графики зависимости жесткости углового защемления от параметра θ для ферм из круглых и прямоугольных труб, сваренных из двух прокатных уголков. Аналогичное сравнение в зависимости от параметра v (рис. 3, *б*) затруднительно в связи с разной «толстостенностью» круглых труб и прокатных уголков.

На рис. 4 показаны графики зависимости линейной жесткости r при продавливании пояса стойкой от параметров v и θ .

a)



б)

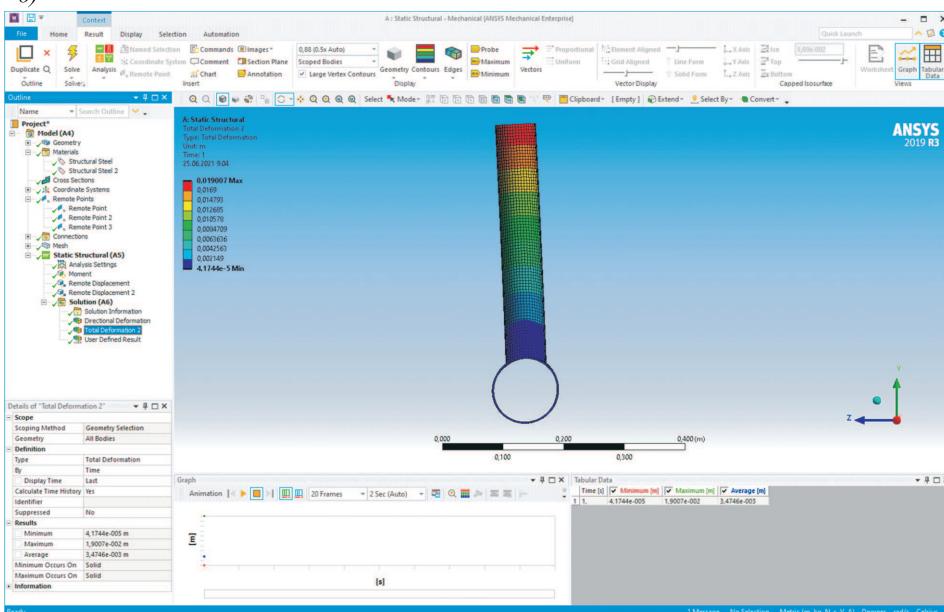


Рис. 2. Перемещение узлов сетки по оси X (а) и по оси Y (б)

Fig. 2. Moving the grid nodes along the X-axis (a) and along the Y-axis (b)

Выводы. 1. При изменении параметра θ в пределах 0,4–0,9 жесткость в отношении поворота c увеличивается в 9–10 раз как в плоскости, так и из плоскости фермы (см. рис. 3, а). Большая жесткость из плоскости фермы может быть объяснена значительной жесткостью на кручение круглой трубы.

Существенно то, что угловая жесткость c для ферм из прямоугольных труб, сваренных из двух уголков (рис. 3, а), из плоскости фермы меньше чем

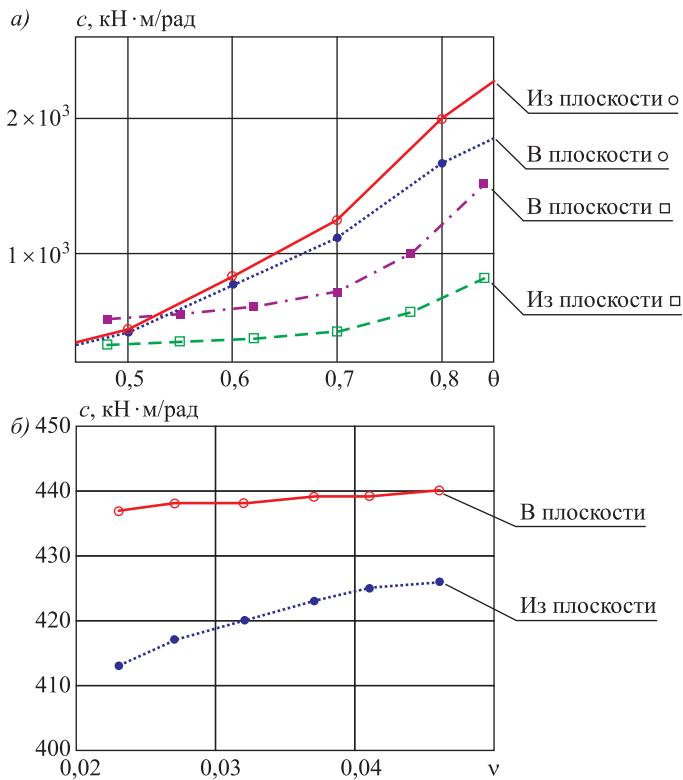


Рис. 3. Зависимость жесткости углового защемления от параметров θ (а) и v (б)

Fig. 3. The dependence of the stiffness of the angular pinching on the parameters θ (a) and v (b)

в плоскости, что объяснимо меньшей крутильной жесткостью прямоугольного пояса.

2. При изменении параметра v в пределах 1/50–1/20 (рис. 3, б) жесткость c увеличивается не более чем на 3–5 % как в плоскости, так и из плоскости фермы, т.е. влияние параметра v менее значимо.

3. Линейная жесткость r при продавливании пояса в большей степени зависит от параметра v (рис. 4) и при его увеличении от 1/50 до 1/20 возрастает в 1,5–2 раза. Влияние параметра θ на величину r несущественно.

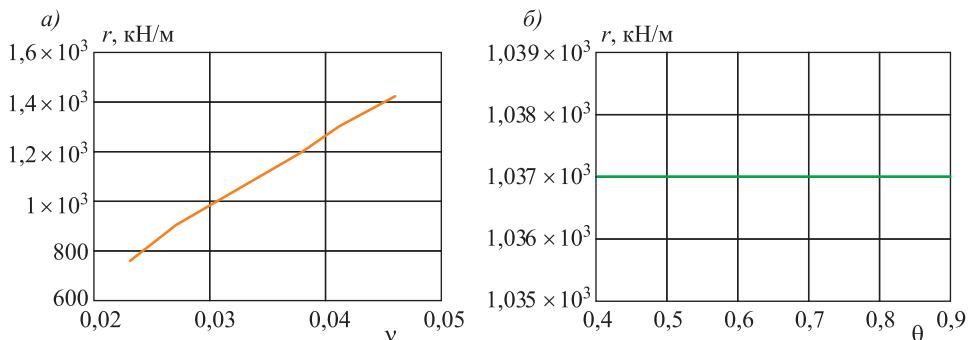


Рис. 4. Зависимость жесткости при продавливании от параметров v (а) и θ (б)

Fig. 4. The dependence of the stiffness during pinching on the parameters v (a) and θ (b)

В заключение можно отметить, что оценка влияния параметров θ и v на жесткость защемления стержней решетки в поясах бесфасоночных ферм из круглых труб является предварительной. Более точной будет аналогичная оценка на модели фермы. Также предварительно можно оценить коэффициенты расчетной длины для сжатых стержней решетки в таких фермах в зависимости от θ и v .

Уточнение коэффициентов расчетной длины позволит повысить надежность расчетов бесфасоночных ферм из круглых труб, а также обеспечить в ряде случаев экономию металла.

Список источников

1. Бирюлев В.В. Металлические конструкции со сварными замкнутыми сечениями из прокатных элементов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1980. № 7. С. 8–14.
2. Кользееев А.А. Оценка влияния формы трубчатого сечения на устойчивость сжатых стержней // Изв. вузов. Строительство. 2007. № 5. С. 91–96.
3. Никифоров С.Н. Устойчивость сжатых стержней сварных ферм. М.; Л.: Госстройиздат, 1938. 82 с.
4. Ривкин А.М. Результаты исследования устойчивости сжатых стержней решетки в фермах из стальных труб // Пром. стр-во. 1971. № 9. С. 42–44.
5. Бирюлев В.В., Галатенко В.А. Исследование Т-образных узлов ферм с коробчатым сечением стержней из прокатных уголков // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1982. № 6. С. 4–9.
6. Бирюлев В.В., Кользееев А.А. Экспериментальное исследование устойчивости стержней ферм из сварных прямоугольных труб // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1984. № 7. С. 9–13.
7. Бельский Г.Е. Устойчивость сжатых стальных стержней с упругими защемлениями концов // Науч. сообщ. ЦНИИСК. Вып. 10. М.: Госстройиздат, 1959. 148 с.
8. Бельский Г.Е. Теоретические и экспериментальные исследования деформативности и устойчивости упругозашемленных стержней // Расчет конструкций, работающих в упругопластической стадии: Сб. тр. ЦНИИСК. Вып. 7. М.: Госстройиздат, 1961. С. 125–185.
9. Пяхович Л.С. К расчету систем с односторонними связями на прочность и устойчивость // Исследования по строительным конструкциям: Сб. науч. тр. ТИСИ. Томск, 1972. С. 157–166.

References

1. Biryulev V.V. Steel structures with welded closed sections from rolled elements. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura = News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture.* 1980; (7): 8–14. (In Russ.).
2. Kolzeev A.A. Evaluation of the influence of the shape of a tubular section on the stability of compressed rods. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2007: (5): 91–96. (In Russ.).
3. Nikiforov S.N. Stability of compressed steel bars of welded trusses. Moscow; Leningrad: Gosstroyizdat, 1938. 82 p. (In Russ.).
4. Rivkin A.M. The results of study of stability of compressed lattice bars in trusses of steel tubes. *Promyshlennoye stroitel'stvo = Industrial construction.* 1971; (9): 42–44. (In Russ.).

5. Biryulev V.V., Galatenko V.A. Research on T-shaped nodes of trusses with box-shaped cross-section of bars from rolled angles. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura = News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture.* 1982; (6): 4–9. (In Russ.).
6. Biryulev V.V., Kolzeev A.A. Experimental research of the stability of bars of trusses made of welded rectangular tubes. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura = News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture.* 1984; (7): 9–13. (In Russ.).
7. Belskiy G.E. Stability of compressed steel bars with elastic restraining of the ends. Scientific report TsNIISK. Issue 10. Moscow: Gosstroyizdat, 1959. 148 p. (In Russ.).
8. Belskiy G.E. Theoretical and experimental studies of the deformability and stability of elastically restrained bars. Calculation of structures operating in the elastic-plastic stage: Collection of works of TsNIISK. Issue 7. Moscow: Gosstroyizdat, 1961. P. 125–185. (In Russ.).
9. Lyakhovich L.S. To the calculation of systems with one-way bonds for strength and stability. Research on building structures: Collection of scientific works of TISI. Tomsk, 1972. P. 157–166. (In Russ.).

Информация об авторах

А.А. Колзееев – кандидат технических наук, доцент, a.kolzeyev@sibstrin.ru

В.Д. Ворожейкин – студент, vvladimird23@mail.ru

Information about the authors

A.A. Kolzeyev – PhD, Ass. Professor, a.kolzeyev@sibstrin.ru

B.D. Vorozheykin – Student, vvladimird23@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.05.2022

The article was submitted 20.05.2022

Одобрена после рецензирования 20.06.2022

Approved after reviewing 20.06.2022

Принята к публикации 27.06.2022

Accepted for publication 27.06.2022