

Электроэнергетика

Electric Power Engineering

Научная статья
УДК 621.311.21
DOI: 10.14529/power220101

РАЗРАБОТКА МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ МАЛЫХ РЕК ГОРНОЗАВОДСКОЙ ЗОНЫ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ

*Егор Евгеньевич Кожевников, asp20kee531@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0358-792X>
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*

Аннотация. Производство электроэнергии на малых гидроэлектростанциях привлекательно как с экологической, так и с экономической точки зрения. Технологические инновации и меры по снижению воздействия на окружающую среду делают малые гидроэлектростанции недорогим и оправданным источником возобновляемой энергии, который обеспечивает возможность выработки на независимой основе и помогает не только защитить окружающую среду, но и ослабить зависимость человека от ископаемого топлива. Это исследование посвящено поиску решений, основанных на технологиях и инновациях возобновляемых источников энергии на примере Челябинской области. Экспериментальная модель водяного колеса для микроГЭС, представленная в данной статье, и проведенные исследования на основе данной модели были использованы для проведения предварительных расчетов. В итоге нами было получено, что представленные микроГЭС способны вырабатывать около 9–13 кВт·ч, около 170–266 кВт·ч/день и от 63 до 99 МВт·ч/год.

Ключевые слова: гидроэнергетика, производство электроэнергии, микрогидроэлектростанция, горнозаводская зона

Для цитирования: Кожевников Е.Е. Разработка микрогидроэлектростанций для малых рек горнозаводской зоны Челябинской области // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 1. С. 5–11. DOI: 10.14529/power220101

Original article
DOI: 10.14529/power220101

DEVELOPMENT OF MICROHYDROPOWER PLANTS FOR SMALL RIVERS IN THE CHELYABINSK REGION MINING ZONE

*Egor E. Kozhevnikov, asp20kee531@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0358-792X>
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*

Abstract. Small hydroelectric power generation is attractive from both an environmental and economic point of view. Technological innovations and mitigation measures are making small hydroelectric power plants an inexpensive and viable source of renewable energy which can be generated independently. They contribute not only to environmental protection, but also reduce human dependence on fossil fuels. This study is dedicated to finding solutions based on renewable energy source technologies and innovations using the example of the Chelyabinsk region. The experimental model of a micro-hydroelectric power station water wheel presented in this article, and the studies carried out on the basis of this model were used to carry out preliminary calculations. As a result, we found that such micro-hydroelectric power plants are capable of generating about 9–13 kW·h, about 170–266 kW·h/day and from 63 to 99 MW·h/year.

Keywords: hydropower, power generation, microhydroelectric power station, mining zone

For citation: Kozhevnikov E.E. Development of microhydropower plants for small rivers in the Chelyabinsk region mining zone. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering.* 2022;22(1):5–11. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220101

Введение

Обеспечение хранения и передачи энергии является одним из ключевых вопросов в области энергетики. Так, из-за многократного преобразования одного вида энергии в другой мы теряем до половины всей вырабатываемой электроэнергии [1].

В то же время в Челябинской области имеется огромный запас возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Ресурс ВИЭ, по оценкам экспертов, в нашей области превышает ресурс невозобновляемых источников энергии в виде органического топлива примерно в три раза. В области созданы все условия для выработки электроэнергии за счет возобновляемых источников. Так, количество солнечных дней в Челябинской области составляет более 110, кроме того, присутствует множество горных рек в горнозаводской зоне и подходящие для установки ГЭС территории. Такое обилие энергоресурсов необходимо внедрять в практику производства электроэнергии нашего региона [2].

Использование ВИЭ (ветряных, солнечных, биоэнергетических морских приливов и волн) дает массу преимуществ. Как одно из них можно предположить отсутствие необходимости покупки дорогого топлива. Другим преимуществом можно выделить возможность решения проблемы электроснабжения отдаленных районов. Для территорий, где строительство электросетей экономически нецелесообразно, например, для малонаселенных мест, актуальность этого решения особенно велика [3].

Так, в горнозаводской зоне Челябинской области имеются небольшие реки, на которых возможно установить микрогидроэлектростанцию для выработки электроэнергии.

Сейчас в области проектирования ГЭС все движется к схемам упрощения управления и работы без обслуживающего персонала. Благодаря этому рентабельность современных микроГЭС многократно возросла. Возможность повышения эффективности работы микроГЭС и как следствие объема подачи электроэнергии в сеть стало возможным благодаря многоцелевому использованию ее конструкции. Однако это повлекло за собой необходимость в регулировке на изолированной нагрузке частоты и напряжения. В условиях достаточной емкости резервуара предусматривается только суточное и недельное регулирование, в остальных случаях рекомендуется регулирование посредством балластной загрузки [4].

Основными составляющими гидроагрегата микроГЭС являются турбина, генератор и система автоматического управления. Исходя из используемых водных ресурсов, микроГЭС по своим характеристикам делятся [5]:

- 1) на русловые;
- 2) безнапорные;
- 3) примыкающие;
- 4) гидроаккумулирующие;
- 5) приливно-отливные;
- 6) смешанные.

Одним из возможных эффективных направлений развития использования возобновляемых источников энергии в Челябинской области является использование энергии малых водотоков [6].

МикроГЭС обладают следующими особенностями [7].

1. Выработка энергии производится практически бесплатно.

2. Ввод в эксплуатацию происходит в короткие сроки.

3. Отсутствует зависимость от цен на нефть, уголь и другие топлива.

4. Практически не оказывают негативного воздействия на окружающую среду.

5. Образовываются намного меньшие площади затопления относительно других гидрообъектов.

6. В меньшей степени нарушается нормальная естественная среда обитания фауны относительно других энергообъектов.

7. Нет необходимости в длительном строительстве ЛЭП.

8. Относительно более крупных гидроэлектростанций стоимость выработанной электроэнергии оказывается выше.

В местах отсутствия централизованной поставки электроэнергии установка таких микроГЭС может стать одним из решений проблемы электроснабжения.

1. Основные положения исследования

В данной работе целью ставилось производство расчета разработанной модели гидроагрегата микроГЭС для горнозаводской зоны Челябинской области. Первоначально, используя компьютерную графику, автор выполнил модель водяного колеса микроГЭС, представленную на рис. 1. Впоследствии, опираясь на разработанную компьютерную модель, сконструировали предварительный опытный образец.

На рис. 2 представлена полученная в конечном итоге экспериментальная модель водяного колеса микроГЭС. Автором были проведены исследования с использованием данной модели. На рис. 3 показана экспериментальная установка для исследования модели водяного колеса микроГЭС. Для предварительного расчета были использованы результаты, полученные из экспериментального исследования.

В табл. 1 и на рис. 4 представлены результаты измерений среднемесячного расхода реки Катав, протекающей рядом с селом Верх-Катавка в Катав-Ивановском районе Челябинской области.

Количество вырабатываемой электроэнергии может быть вычислено с помощью следующей формулы

$$N_i = g \cdot \eta \cdot Q_i \cdot H_i, \quad (1)$$

где N_i – удельная мощность реки, кВт;

Q_i – расход воды, м³/с;

H_i – падение исследуемого участка реки, м;

g – ускорение свободного падения, м²/с²;

η – коэффициент полезного действия, 0,5.

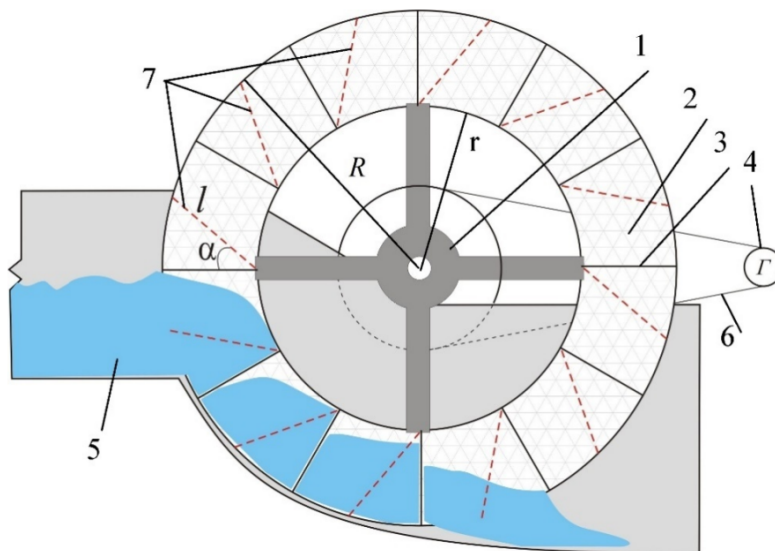


Рис. 1. Компьютерная модель создаваемого водяного колеса микроГЭС:
 1 – вал; 2 – колесо; 3 – лопасть; 4 – генератор; 5 – течение воды; 6 – ременная передача; 7 – лопасти с изменением угла; R – внешний радиус колеса; r – внутренний радиус колеса; l – длина колеса; α – угол наклона лопастей
Fig. 1. Computer model of the created water wheel of the micro hydroelectric power station:
 1 – shaft; 2 – wheel; 3 – blade; 4 – generator; 5 – water flow; 6 – belt drive; 7 – blades with angle change; R is the outer radius of the wheel; r is the inner radius of the wheel; l – wheel length; α – angle of inclination of the blades



Рис. 2. Разработанное водяное колесо микроГЭС
Fig. 2. The designed water wheel of micro-hydro power plant



Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования модели водяного колеса микроГЭС
Fig. 3. Experimental setup for the study of the water wheel model of a micro-hydroelectric power station

Среднемесячный расход реки Катав

Таблица 1

Average monthly discharge of the Katav River

Table 1

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Расход воды, м ³ /с	3,26	3,41	3,32	3,34	3,31	3,28	3,44	3,5	3,48	3,29	3,23	3,25

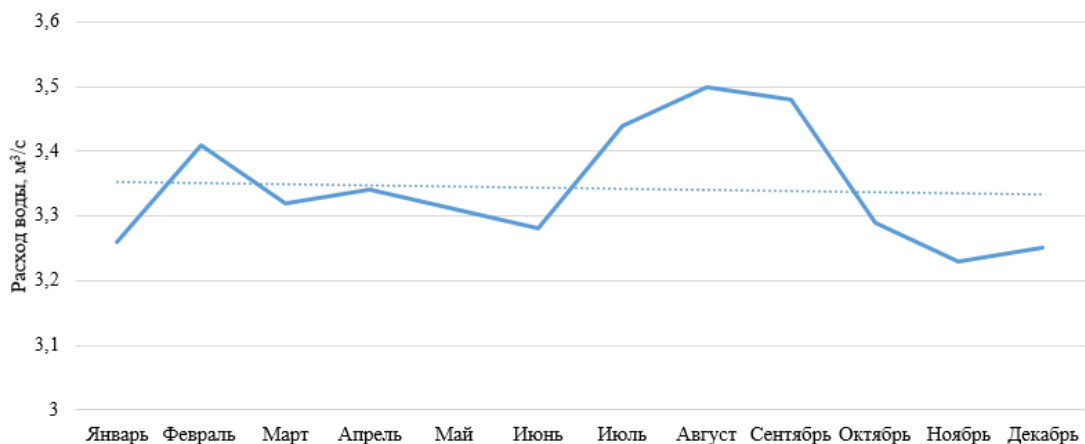


Рис. 4. Среднемесячный расход реки Катав рядом с селом Верх-Катавка
Fig. 4. Average monthly discharge of the Katav River near the village of Verkh-Katavka

2. Полученные результаты

Полученные результаты для исследуемой модели гидроагрегата при различных расходах воды в реке приведены в табл. 2 и на рис. 5.

Исходя из табл. 3, можно сделать вывод о том, что увеличение скорости водяного колеса напрямую связано с увеличением скорости потока воды (рис. 6), как следствие, увеличивает электри-

Таблица 2

Удельная мощность реки Катав

Table 2

Specific power of the Katav River

Месяц	Расход воды Q_i , м³/с	Падение исследуемого участка реки H_i , м	Ускорение свободного падения g , м²/с	Коэффициент полезного действия η	Удельная мощность реки N_i , кВт
Январь	3,26	2,5	9,8	0,5	39,9
Февраль	3,41	2,5	9,8	0,5	41,8
Март	3,32	2,5	9,8	0,5	40,7
Апрель	3,34	2,5	9,8	0,5	40,9
Май	3,31	2,5	9,8	0,5	40,6
Июнь	3,28	2,5	9,8	0,5	40,2
Июль	3,44	2,5	9,8	0,5	42,1
Август	3,50	2,5	9,8	0,5	42,9
Сентябрь	3,48	2,5	9,8	0,5	42,6
Октябрь	3,29	2,5	9,8	0,5	40,3
Ноябрь	3,23	2,5	9,8	0,5	39,6
Декабрь	3,24	2,5	9,8	0,5	39,7

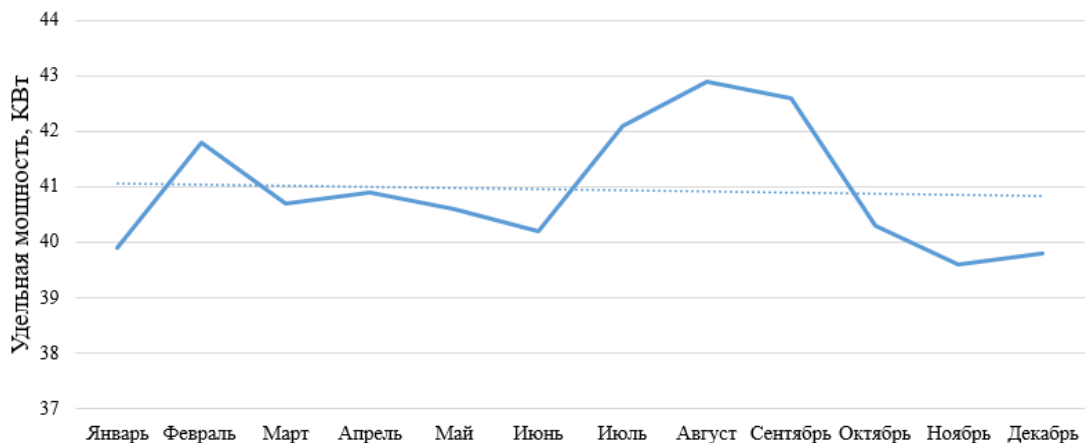


Рис. 5. Удельная мощность реки Катав
Fig. 5. Specific power of the Katav River

Таблица 3

Зависимость оборотов колеса микроГЭС от скорости потока

Table 3

The dependence of the wheel speed of a micro-hydro power plant on the flow rate

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Скорость потока, м/с	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1
Частота вращения, об/мин	19,2	22	23,1	24,9	26,7	28,6	30,8	32,6	34,5	36,4	38,3	40,2

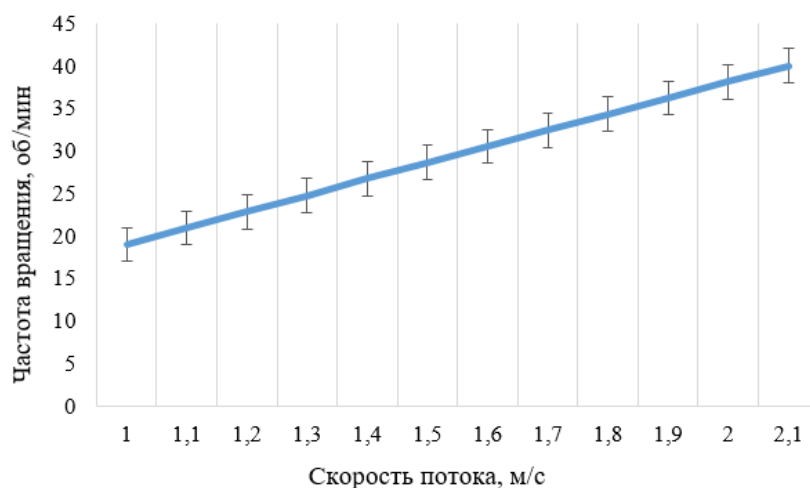


Рис. 6. Зависимость оборотов колеса микроГЭС от скорости потока
 Fig. 6. Dependence of the wheel speed of the micro-hydro power plant on the flow rate

ческую мощность микроГЭС. Поэтому мощность микроГЭС зависит от индивидуальных факторов местности, таких как расход, скорость и падение воды на исследуемом участке реки. Для определения числа оборотов n водяного колеса используется следующая формула

$$n = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{v}{R} \quad (2)$$

где v – скорость течения, м/с;

R – радиус колеса, м;

π – отношение периметра колеса к его диаметру, 3,14;

Рис. 6 показывает, что скорость потока воды прямо пропорциональна мощности микроГЭС. Во время проведения эксперимента также было замечено, что при увеличении скорости потока увеличивается и расход.

Разработанная микрогидроэлектростанция оборудована на водотоке в условиях низкого давления (рис. 7), где установлен накопитель электроэнергии для регулирования потока энергии (рис. 8). Для испытания микроГЭС было введено в работу водяное колесо, соединенное с генератором с помощью ременной передачи. Результаты испытаний микрогидроэлектростанции приведены в табл. 4.

Если мобильная микроГЭС будет работать непрерывно, то согласно нашему исследованию можно сделать вывод, что она сможет вырабатывать порядка 9–13 кВт·ч, около 170–266 кВт·ч/день и от 63 до 99 МВт·ч/год.

Срок окупаемости затрат на оборудование микроГЭС был вычислен по формуле

$$K = \frac{C}{N_n \cdot 24 \cdot 365 \cdot T} \quad (3)$$

где K – срок окупаемости затрат на оборудование, год;

C – общая стоимость оборудования, руб.;

T – цена (тариф) на электрическую энергию за 1 кВт, руб.;

N_n – номинальная активная мощность оборудования, кВт.

Ранее нами уже была подсчитана общая стоимость оборудования (C), которая составила 260 тыс. руб. Для того чтобы определить цену (тариф) на электрическую энергию за 1 кВт, мы воспользовались статистикой цен за июль 2021 г. Она составила 2,43 руб. за 1 кВт·ч [8]. Номинальную активную мощность оборудования N_n мы вычислили, воспользовавшись табл. 2. В итоге мы получили, что $N_n = 40,2$ кВт.

Подставляя все в формулу (3), получим

$$K = \frac{260\,000}{40,2 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 2,43} \approx 0,3.$$

В итоге разработанное оборудование окупится менее чем за полгода. Скорость водяного колеса увеличивается по мере увеличения скорости потока воды (см. рис. 5), и это приводит к повышению электрической мощности микроГЭС. Исходя из этого, мы получаем прямую зависимость мощности микроГЭС от индивидуальных факторов местности, таких как расход, скорость и падение воды на исследуемом участке реки.



Рис. 7. Внешний вид установленного водяного колеса
Fig. 7. Appearance of the installed water wheel



Рис. 8. Внешний вид накопителя электроэнергии
Fig. 8. Appearance of the energy storage

Результаты испытаний микрогидроэлектростанции

Micro hydro power plant test results

Таблица 4

Table 4

Номер испытания	Сила тока, А	Напряжение, В	Выработанная электроэнергия, кВт·ч
1	40,39	200	8,8
2	41,8	234	9,8
3	46,4	224	10,4
4	44,5	207	9,2
5	45,3	210	9,6
6	40,2	214	8,6

Вывод

Исследования показали возможность и целесообразность использования малых ГЭС. Технологические инновации и меры по снижению воздействия на окружающую среду делают малые гидроэлектростанции недорогим и оправданным источ-

ником возобновляемой энергии, который обеспечивает возможность выработки на независимой основе и помогает не только защитить окружающую среду, но и ослабить зависимость человека от ископаемого топлива.

Список литературы

1. Ушаков В.Я. Основные проблемы энергетики и возможные способы их решения. Известия Томского политехнического университета // Инжиниринг георесурсов. 2011. Т. 319, № 4. С. 5–13.
2. Кожевников Е.Е., Вахрушев А.С. Использование гидроэнергетического потенциала стока рек горнозаводской зоны для развития гидроэнергетики Челябинской области // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2021. Т. 21, № 3. С. 76–82. DOI: 10.14529/power210309
3. Александрова А.А. Преимущества использования возобновляемых источников энергии по сравнению с традиционными источниками энергии // Научные основы современного прогресса: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 6–7.
4. Кунелбаев М.М., Мекебаев Н.О. Имитационная модель микрогидроэлектростанции // Инновации в науке. 2014. Т. 21, № 40. С. 1–7.
5. Баклин А.А., Агафонова Ю.В. Преимущества и принцип работы микрогидроэлектростанции // Современные проблемы развития техники и технологий: сб. тр. конф. Пенза, 2016. С. 195–198.
6. Оценка экономической эффективности гидроэнергетических сооружений с учетом их жизненного цикла / О.С. Пташкина-Гирина, Н.С. Низамутдинова, О.А. Гусева, О.С. Волкова // АПК России. 2019. Т. 26, № 2. С. 254–261.
7. Легкий Д.А., Денисенко Е.А. Конструкция и особенности работы микро- и мини-гидроэлектростанций // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сб. ст. конф. Краснодар, 2019. С. 983–985.
8. Шерьязов С.К., Пташкина-Гирина О.С., Низамутдинова Н.С. Экономические показатели возобновляемой энергетики // Вестник НГИЭИ. 2019. № 2 (93). С. 48–58.

References

1. Ushakov V.Ya. [The main energy problems and possible ways to solve them]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2011;319(4):5–13. (In Russ.)
2. Kozhevnikov E.E., Vakhrushev A.S. Utilizing the Hydropower of Rivers in the Mining Zone to Advance Hydropower Engineering in Chelyabinsk Region. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2021;21(3):76–82. (In Russ.) DOI: 10.14529/power210309
3. Aleksandrova A.A. [The advantages of using renewable energy sources in comparison with traditional energy sources]. In: *Nauchnyye osnovy sovremennogo progressa: sb. st. mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Scientific foundations of modern progress: collection of articles of the international scientific and practical conference]; 2016. P. 6–7. (In Russ.)
4. Kunelbayev M.M., Mekebayev N.O. Simulation model of micro hydro power plants. *Innovatsii v nauke*. 2014;21(40):1–7. (In Russ.)
5. Baklin A.A., Agafonova Yu.V. [Advantages and principle of operation of the microhydroelectric power station]. In: *Sovremennyye problemy razvitiya tekhniki i tekhnologiy: sb. tr. konf.* [Modern problems of engineering and technology development: Conference Proceedings]. Penza; 2016. P. 195–198. (In Russ.)
6. Ptashkina-Girina O.S., Nizamutdinova N.S., Guseva O.A., Volkova O.S. Assessment of the economic efficiency of hydropower facilities with their life cycle taken into account. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2019;26(2):254–261. (In Russ.)
7. Legkiy D.A., Denisenko E.A. [Design and features of micro and mini hydroelectric power plants]. *Nauchnoye obespecheniye agropromyshlennogo kompleksa: sb. st. konf.* [Scientific support of the agro-industrial complex: collection of conference articles]. Krasnodar; 2019. P. 983–985. (In Russ.)
8. Sheryazov S.K., Ptashkina-Girina O.S., Nizamutdinova N.S. Economic indicators of renewable energy. *Bulletin NGIEI*. 2019;2(93):48–58. (In Russ.)

Информация об авторе

Кожевников Егор Евгеньевич, аспирант кафедры «Градостроительство, инженерные сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; asp20kee531@susu.ru.

Information about the author

Egor E. Kozhevnikov, Postgraduate Student of the Department “Urban planning, engineering networks and systems”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; asp20kee531@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 25.11.2021; одобрена после рецензирования 28.12.2021; принята к публикации 14.01.2022.

The article was submitted 25.11.2021; approved after reviewing 28.12.2021; accepted for publication 14.01.2022.