

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Научная статья

УДК 626.823.9

doi: 10.31774/2658-7890-2021-3-1-45-54

Влияние конструкции сопряжения водобойной части сооружения с нижним бьефом на кинематику водного потока

Александр Иванович Тищенко

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация, alek.tishencko2013@yandex.ru

Аннотация. Цель: при помощи данных выполненных натурных и лабораторных исследований и их обработки определить влияние конструкции сопряжения водобойной части сооружения с нижним бьефом на кинематику водного потока. Актуальность данного вопроса заключается в том, что при неудовлетворительном сопряжении водобойной части сооружения с откосами отводящего русла в последнем образуются негативные явления в виде сбойных течений, водоворотных зон у откосов канала и др., влияющие на устойчивость крепления рисбермы, создавая угрозу устойчивости самого сооружения. **Материалы и методы:** материалами явились данные натурных исследований, выполненных на ряде гидротехнических сооружений оросительных систем в Ставропольском крае, а также на моделях в лабораторных условиях с выявлением влияния конструкций сопряжения водобойной части с откосами отводящего канала на распределение водного потока в нижнем бьефе. Измерение скоростей в натурных условиях производилось путем наблюдения движения поплавков-интеграторов в отводящем русле. На модели скорости измерялись с помощью микровертушки, а траектории прослеживались с помощью светящихся поплавков. **Результаты:** на основании полученных сведений построены графики зависимости искомых факторов от известных параметров, а с применением методов математической статистики был получен коэффициент конструкции сопряжения водобойной части сооружения с откосами канала в нижнем бьефе. Результатом исследований явилась эмпирическая зависимость для определения скорости движения потока по его динамической оси, что составляет научную новизну выполненных исследований. **Выводы:** на гидравлический режим потока на рисберме и в отводящем русле большое влияние оказывает тип сопряжения водобойной части сооружения с откосами отводящего русла. Каждый тип сопряжения создает внезапное расширение потока на рисберме, что влияет на величину средней скорости потока по динамической оси, от которой зависит деформационное состояние отводящего русла.

Ключевые слова: водобойная часть, откосы канала, натурные исследования, сбойные течения, водоворотные зоны, придонная скорость течения

HYDRAULIC ENGINEERING

Original article

Impact of the conjugation construction of the apron section structure with the tailrace on water flow kinematics

Aleksandr I. Tishchenko

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation, alek.tishencko2013@yandex.ru

Abstract. Purpose: to determine the impact of the conjugation construction of the apron section structure with the downstream on the water flow kinematics with the use of



the performed field and laboratory studies data and their processing. The relevance of this issue lies in the fact that in case of unsatisfactory conjugation of the apron with the discharge canal slopes, negative phenomena are formed in it in the form of faulty currents, whirlpools at the canal slopes, etc., affecting the stability of the apron conjugation, creating a threat to the stability of the structure itself. **Materials and Methods:** the materials were the data of field studies carried out on a number of hydraulic structures of irrigation systems in Stavropol Territory, as well as on models in laboratory conditions with the identification of the impact of conjugation structures of the apron with the discharge canal slopes on the water flow distribution in tailrace. The measurement of velocities in natural conditions was carried out by observing the integrating floats movement in the discharge canals. On the model, the velocities were measured using a miniflowmeter, and the trajectories were traced using luminous floats. **Results:** graphs of the dependence of the sought factors on the known parameters were built on the basis of the information obtained, and using the methods of mathematical statistics, the coefficient of the conjugation of the apron structure with the canal slopes in tailrace was obtained. The result of the research was an empirical dependence for determining the flow velocity along its dynamic axis, which is the scientific novelty of the research performed. **Conclusions:** the type of conjugation of the apron of the structure with the distribution canal slopes has a great influence on the hydraulic flow regime on the apron and in the discharge canal. Each type of conjugation creates a sudden expansion of the flow on the apron, which affects the value of the average flow velocity along the dynamic axis, on which the deformation of the discharge canal depends.

Keywords: apron, canal slopes, field studies, faulty currents, whirlpool zones, bed current velocity

Введение. Практика проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений показала, что сопряжение водобойной части сооружения с откосами отводящего русла в конструктивном исполнении имеет четыре типа: ныряющие стенки, обратные стенки, раструб с открьлками и косые плоскости [1–4]. Каждый из этих типов имеет свои особенности в формировании режима движения потока в нижнем бьефе сооружения. В связи с этим актуальным является вопрос сопряжения водобойной части сооружения с откосами отводящего русла канала и влияния этого сопряжения на гидравлический режим водного потока в пределах рисбермы и на некотором расстоянии от нее вниз по течению. Для решения этого вопроса необходимо выяснить фактическое влияние каждой конструкции на режим движения потока за сооружением с учетом негативных явлений в виде сбойных течений, раскачки уровня воды в нижнем бьефе, образования и распространения в плане водоворотных зон и других негативных явлений, приводящих к неудовлетворительному состоянию креп-

ления рисбермы и угрожающих устойчивости гидротехнического сооружения, безопасности и надежности его работы [5, 6].

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели нами выполнены исследования ряда сетевых гидротехнических сооружений оросительных систем Ставропольского края, данные которых явились материалом для оформления научной статьи и выдачи предложений для внедрения в проектную документацию [7]. В процессе исследований велись записи о типе сопряжения нижнего оголовка сооружения с отводящим руслом, для определения траектории поплавков-интеграторов производилась их фиксация в намеченных створах отводящего канала с помощью секундомера. Для определения скорости течения в различных точках по глубине вертикали (0,2; 0,6; 0,8 и у дна) длина поплавков изменялась соответственно этим глубинам. По полученным значениям скоростей в точках вертикали определялась средняя скорость на вертикали с использованием рекомендаций, приведенных в работах В. Д. Быкова, Р. Р. Масумова, Ю. А. Вязьмина, И. А. Шикломанова и др. [8–11]. Сведения об исследованных сооружениях приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сведения о типах сопряжения выходного оголовка сооружения и наличии гасителя избыточной энергии водного потока

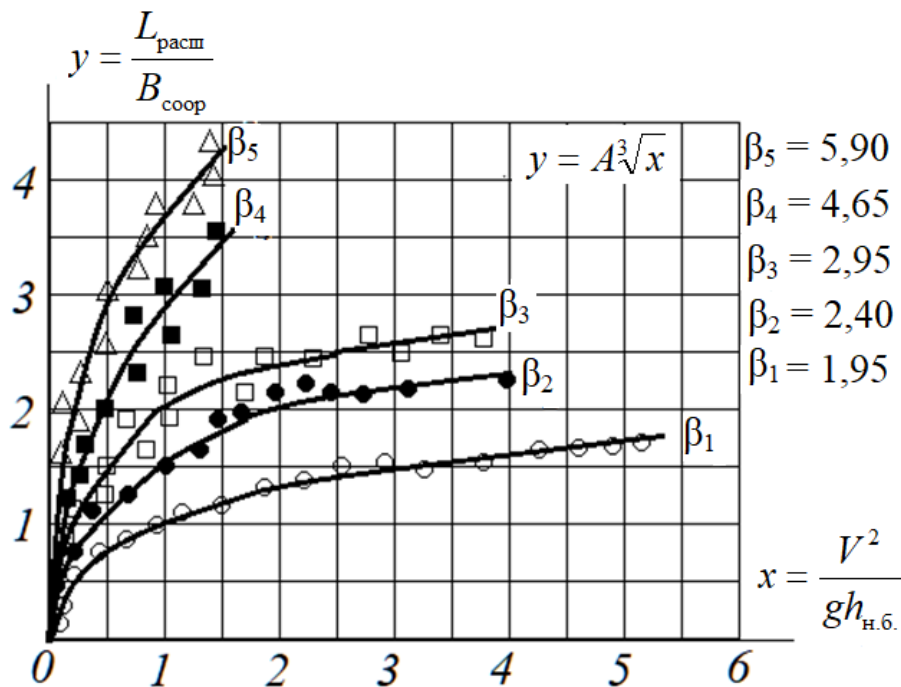
Название сооружения и место его расположения	Тип сопряжения нижнего оголовка	Вид гасителя энергии потока
1	2	3
1 Шлюз-регулятор 0 на 34-м километре Большого Ставропольского канала (БСК)	Нырляющие стенки	Водобойная стенка
2 Шлюз-регулятор 4 на 128-м километре БСК	Раструб с открылками	Двойной зубчатый порог
3 Сброс в р. Калаус – быстроток в конце 1-й очереди БСК	Нырляющие стенки	Пирсы и водобойная стенка
4 Водомер Вентури на ПК 0 + 50 Дивенского распределителя	Обратная стенка	Отсутствует
5 Шахтный перепад на ПК 254 Дивенского распределителя	Нырляющие стенки	Отсутствует
6 Шахтный перепад на ПК 355 Дивенского распределителя	Нырляющие стенки	Отсутствует
7 Быстроток на ПК 16 Большого Левобережного канала Курской ООС	Транзитный быстроток	Отсутствует

Продолжение таблицы 1

1	2	3
8 Быстроток на ПК 35 Большого Левобережного канала Курской ООС	Транзитный быстроток	Водобойный колодец
9 Быстроток на ПК 39 Большого Левобережного канала Курской ООС	Транзитный быстроток	Пирсы и водобойный колодец
10 Трубчатый переезд-перепад на ПК 60 Большого Левобережного канала	Обратная стенка	Водобойный колодец
11 Быстроток на ПК 79 Большого Левобережного канала Курской ООС	Транзитный быстроток	Отсутствует
12 Переезд-перепад на ПК 80 Большого Левобережного канала	Обратная стенка	Водобойный колодец
13 Переезд-перепад на ПК 260 Большого Левобережного канала	Обратная стенка	Водобойный колодец
14 Переезд-перепад на ПК 410 Большого Левобережного канала	Обратная стенка	Отсутствует
15 Быстроток на ПК 7 Советского канала Курской ООС	Ныряющие стенки	Водобойный колодец
16 Быстроток на ПК 40 Советского канала Курской ООС	Ныряющие стенки	Водобойный колодец
17 Быстроток на ПК 50,5 Советского канала Курской ООС	Ныряющие стенки	Водобойный колодец
18 Быстроток на ПК 147 Советского канала Курской ООС	Ныряющие стенки	Отсутствует
19 Шлюз-регулятор на ПК 0 + 1 I Сухопадинского канала Курской ООС	Обратная стенка	Пирсы и водобойный колодец
20 Быстроток на ПК 45 I Сухопадинского канала Курской ООС	Транзитный быстроток	Отсутствует
21 Быстроток на ПК 148 I Сухопадинского канала Курской ООС	Ныряющие стенки	Отсутствует

Результаты и обсуждения. Большое научное и практическое значение имеет определение длины участка расширения стесненного потока. При известной длине этого участка проектировщик может назначить рациональную длину крепления откосов отводящего русла. При поступлении потока в «сухое» отводящее русло с гладким водобоем вода растекается по всей ширине дна водотока. При достижении глубины воды в нижнем бьефе $0,10h_{кр}$ (критической глубины) у откосов за водобойной частью сооружения образуются боковые водовороты, которые сжимают с боков транзитную струю и покрывают ее сверху. При увеличении глубины воды в нижнем бьефе до $0,95h_{кр}$ в потоке появляется сбойное течение, называемое «динамической осью», она обладает высокими скоростями, затухающими

на значительном расстоянии от сооружения. На рисунке 1 представлены кривые зависимости длины участка расширения водного потока от степени бурности в створе внезапного расширения (конец водобойной части).



β – коэффициент внезапного расширения

Рисунок 1 – Зависимость длины участка расширения потока от критерия бурности в начале этого участка

Для полученного семейства кривых с помощью метода наименьших квадратов [1] найдена общая эмпирическая зависимость для определения длины участка расширения струи в ограниченном пространстве:

$$L_{\text{расш.}} = A \frac{B_{\text{соор}}^5 \sqrt{gh_{\text{н.б.}}}}{\sqrt[3]{V}}, \quad (1)$$

где A – коэффициент, зависящий от степени расширения потока, значения которого приведены в таблице 2;

$B_{\text{соор}}$ – полная ширина сооружения в конце водобойной части, м;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

$h_{\text{н.б.}}$ – глубина воды в нижнем бьефе, м;

V – средняя скорость в живом сечении стесненного потока, м/с.

Таблица 2 – Значения коэффициента A к формуле (1)

Коэффициент расширения потока β	1,95	2,40	2,95	4,65	5,90
Значение коэффициента A	1,10	1,60	2,00	3,00	3,60

Формула (1) может быть использована для проектирования регулирующих сооружений с удельным расходом до $10 \text{ м}^2/\text{с}$ и числом Фруда в конце водобойной части сооружения $Fr = 0,264$ (бурное состояние).

Длины участков расширения, подсчитанные по формуле (1), хорошо согласуются с данными натурных исследований. Эта формула рекомендована в производство, так как она позволяет узнать, на какую фактическую длину необходимо выполнить крепление берегов отводящего русла.

В работах, посвященных деформациям грунтовых русел, главное внимание обращено на влияние придонной скорости потока на размыв грунта в нижнем бьефе сооружения. До настоящего времени неизученным остается вопрос зависимости придонной скорости от средней скорости в живом сечении или между средними скоростями в живом сечении и на вертикали, что очень важно при проектировании мелиоративных сооружений. Среднюю скорость в живом сечении легко можно определить, имея данные о проектируемом расходе и размерах поперечного сечения канала.

Решение данного вопроса теоретически недоступно, полуэмпирическое решение сложно и громоздко. Единственное доступное и удовлетворяющее решение – эксперимент с получением эмпирических зависимостей.

Выполненные нами опыты в натуральных и лабораторных условиях позволили частично решить этот вопрос для сооружений мелиоративных систем с критерием бурности $Fr = 0,0406...0,264$ и коэффициентом внезапного расширения потока $\beta = 2,17...7,45$. По данным опытов было построено семейство кривых, представленных на рисунке 2.

Полученная система кривых аппроксимировалась общим уравнением:

$$U_{\text{д.макс.}} = B \frac{2,55V \sqrt{h_{\text{кр}}}}{\sqrt{x} + 2\sqrt{h_{\text{кр}}}}, \quad (2)$$

где B – эмпирический коэффициент, зависящий от коэффициента внезапного расширения потока, определяется по найденной зависимости:

$$B = 1,38\sqrt{\beta} \lg \beta; \quad (3)$$

$\beta = B/\sum b$ – коэффициент внезапного расширения потока;

B – ширина водного потока в конце водобойной части сооружения, м;

$\sum b$ – ширина по дну пролета (или пролетов) во входном портале сооружения, м;

V – средняя скорость потока в рассматриваемом живом сечении, м/с;

$h_{кр}$ – критическая глубина в конце водобойной части, м;

x – расстояние от сжатого сечения до рассматриваемого створа, м.

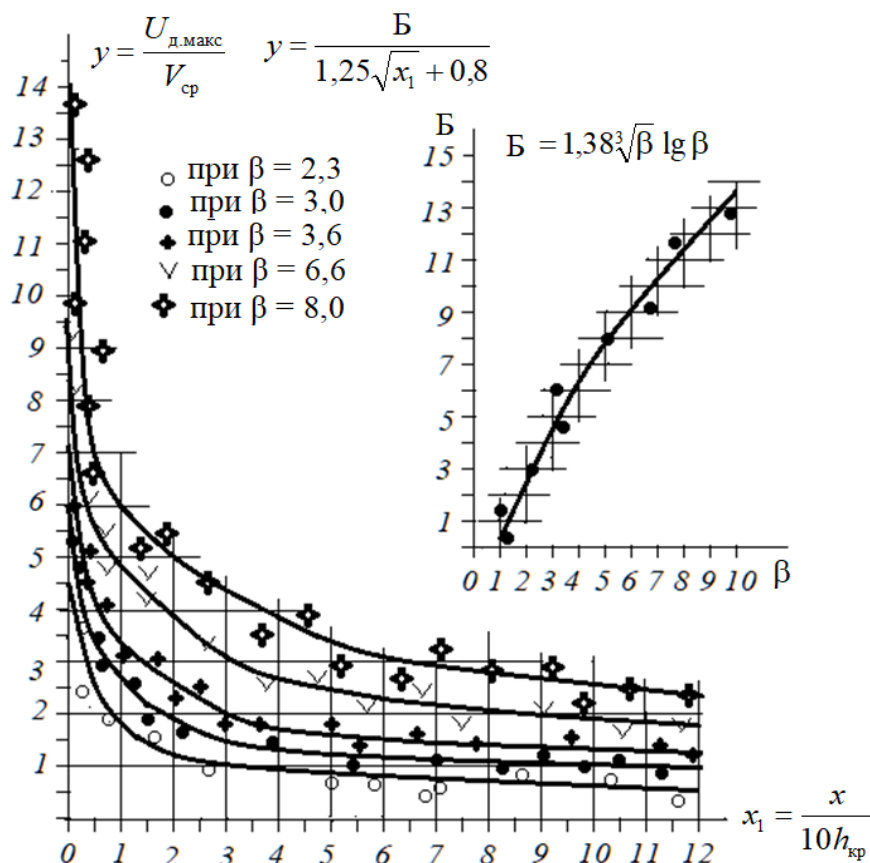


Рисунок 2 – Кривые связи придонной скорости и гидравлических характеристик потока

Исследования, выполненные на натуральных объектах, проводились при значениях коэффициента расширения потока от $\beta = 1,95$ до $\beta = 5,90$.

Они показали, что при пропуске максимальных расходов деформация русла в нижнем бьефе при $\beta = 5,90$ увеличилась в 2,83 раза по сравнению с деформацией, образовавшейся при $\beta = 1,95$. Эти результаты были получены при сопряжении водобойной части сооружения с откосами отводящего русла посредством ныряющих стенок. Аналогичные исследования были выполнены на объектах с сопряжением водобойной части сооружения с откосами отводящего русла посредством обратной стенки, раструба и косых плоскостей. В результате определен коэффициент сопряжения водобойной части с откосами отводящего русла K_c , значения которого приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения коэффициента сопряжения K_c

Конструкция выходного оголовка	Значение коэффициента K_c
Обратная стенка	1,14
Ныряющая стенка	1,00
Раструб с углом роспуска 20°	0,71
Косые плоскости	0,64

Выводы

1 Выполненные исследования показали, что на гидравлический режим потока на рисберме и в отводящем русле большое влияние оказывает тип сопряжения водобойной части сооружения с откосами отводящего русла.

2 При каждом типе сопряжения возникает внезапное расширение потока на рисберме, что влияет на величину средней скорости потока по динамической оси, от которой зависит деформационное состояние отводящего русла.

3 Научной новизной исследований является получение эмпирических зависимостей (1)–(3), позволяющих рассчитать придонную максимальную скорость потока, дающих возможность определить рациональную длину крепления нижнего бьефа, избежав образования деформации русла канала.

4 Исследования позволили определить коэффициент сопряжения водобойной части с откосами отводящего русла K_c .

Список источников

1. Тищенко А. И. Сетевые гидротехнические сооружения: монография. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2008. 247 с.
2. Мелиоративные системы и сооружения: СП 81.13330.2012: утв. Минрегионом России 29.12.11: введ. в действие с 01.01.13. М.: Минрегион России, 2012. 138 с.
3. Щедрин В. Н. Совершенствование конструкций открытых оросительных систем и управления водораспределением. М.: Мелиорация и вод. хоз-во, 1998. 60 с.
4. Перельгин А. И., Белов А. В. Об эксплуатации крупных каналов в условиях реконструкции // Гидротехника. 2014. № 2(35). С. 50–51.
5. О безопасности гидротехнических сооружений [Электронный ресурс]: Федер. закон от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ (с изм. от 3 июля 2016 г.). Доступ из справ. системы «Гарант».
6. Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М., Колганов А. В. Эксплуатационная надежность оросительных систем. М.: Росинформагротех, 2005. 388 с.
7. О требованиях к составу, содержанию и порядку оформления заключения государственной экспертизы проектной документации и результатов инженерных изысканий [Электронный ресурс]: Постановление Правительства РФ от 2 июля 2007 г. № 188: по состоянию на 8 авг. 2013 г. Доступ из справ. системы «Гарант».
8. Быков В. Д., Васильев А. В. Гидрометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 448 с.
9. Масумов Р. Р. Методы измерения расхода воды на реках и каналах, в напорных трубопроводах насосных станций и оросительных систем: обзор. Ташкент, 2015. 84 с.
10. Новая редакция методики измерения расхода и объема жидкости в безнапорных водоводах МИ 2220-13 / Ю. А. Вязьмин, В. Н. Корнеев, О. Д. Лойцкер, М. А. Мордясов, В. И. Никитин, М. Н. Шафрановский // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 8. С. 76–78.
11. Shiklomanov I. A., Balonishnikova J. A. World water use and water availability: trends, scenarios, consequences. Water Resources Systems – Hydrological Risk, Management and Development. IAHS Publ. 2003. № 281. P. 358–364.

References

1. Tishchenko A.I., 2008. *Setevye gidrotekhnicheskie sooruzheniya: monografiya* [Net Hydraulic Engineering Structures: monograph]. Novocherkassk, YRSTU, 247 p. (In Russian).
2. *Meliorativnye sistemy i sooruzheniya* [Reclamation Systems and Facilities]. SP 81.13330.2012. Moscow, 2012. (In Russian).
3. Shchedrin V.N., 1998. *Sovershenstvovanie konstruktsiy otkrytykh orositel'nykh sistem i upravleniya vodoraspredeleniem* [Improving the open irrigation systems design and water distribution management]. Moscow, Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo, 60 p. (In Russian).
4. Perelygin A.I., Belov A.V., 2014. *Ob ekspluatatsii krupnykh kanalov v usloviyakh rekonstruktsii* [On operation of large canals under the reconstruction conditions]. *Gidrotekhnika* [Water Resources Engineering], no. 2(35), pp. 50-51. (In Russian).
5. *O bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [On safety of hydraulic structures]. Federal Law of 21 July 1997, no. 117-FZ, as amended on 3 July 2016. (In Russian).
6. Shchedrin V.N., Kosichenko Yu.M., Kolganov A.V., 2005. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' orositel'nykh sistem* [Operational Reliability of Irrigation Systems]. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 388 p. (In Russian).
7. *O trebovaniyakh k sostavu, sodержaniyu i poryadku oformleniya zaklyucheniya gosudarstvennoy ekspertizy proektnoy dokumentatsii i rezul'tatov inzhenernykh izyskaniy* [On the requirements for the composition, content and procedure for issuing the conclusion

of the state examination of project documentation and the results of engineering surveys]. Decree of the Government of the RF of 2 July 2007, no. 188, as of 8 August 2013. (In Russian).

8. Bykov V.D., Vasiliev A.V., 1972. *Gidrometriya* [Hydrometry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 448 p. (In Russian).

9. Masumov R.R., 2015. *Metody izmereniya raskhoda vody na rekakh i kanalakh, v napornykh truboprovodakh nasosnykh stantsiy i orositel'nykh sistem: obzor* [Methods for measuring water flow on rivers and canals, in pressure pipelines of pumping stations and irrigation systems: a review]. Tashkent, 84 p. (In Russian).

10. Vyazmin Yu.A., Korneev V.N., Loytsker O.D., Mordyasov M.A., Nikitin V.I., Shafranovsky M.N., 2013. *Novaya redaktsiya metodiki izmereniya raskhoda i ob'ema zhidkosti v beznapornykh vodovodakh MI 2220-13* [New edition of the method for measuring the flow rate and volume of liquid in free-flow water canals MI 2220-13]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Engineering], no. 8, pp. 76-78. (In Russian).

11. Shiklomanov I.A., Balonishnikova J.A., 2003. World water use and water availability: trends, scenarios, consequences. *Water Resources Systems – Hydrological Risk, Management and Development*. IAHS Publ., no. 281, pp. 358-364.

Информация об авторе

А. И. Тищенко – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент.

Information about the author

A. I. Tishchenko – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.02.2021; одобрена после рецензирования 03.03.2021; принята к публикации 09.03.2021.

The article was submitted 16.02.2021; approved after reviewing 03.03.2021; accepted for publication 09.03.2021.