

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi67.199>
УДК 656.62.052.4:[629/12:532.5]

Анализ методик определения значений скоростей обтекания корпуса судна встречным потоком при заходе в камеру шлюза

Е.В. Зубкова¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7212-0165>

А.Н. Клементьев¹

В.А. Ундалов¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3510-4523>

¹*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Цель работы – провести сравнение результатов расчётов скоростей потока обтекания корпуса судна при его заходе в камеру шлюза по различным методикам. В статье представлены математические зависимости, полученные различными авторами в ходе проведенных ими исследований в зависимости от коэффициента стеснения камеры шлюза корпусом судна. Сделана попытка определения влияния высоты волны, возникающей перед форштевнем в процессе захода создающей уклон поверхности воды и влияние этого фактора на скорость обтекающего потока. Установлено, что значения скоростей обтекающего потока, рассчитанные по различным методикам, имеют расхождения, а сами методики не позволяют определять скорость обтекающего потока при заходе крупнотоннажных судов в камеру шлюза предельно малой ширины. Авторами предложена простая методика расчета скорости обтекания для случаев больших значений коэффициента стеснения с использованием вспомогательного графика.

Ключевые слова: коэффициент стеснения, статический запас воды под днищем судна, высота поперечной волны перед форштевнем судна, скорость обтекающего потока.

Analysis of methods determining the value of the flow's speed when entering the lock chamber

Evgenia V. Zubkova¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7212-0165>

Alexander N. Klementev¹

Vasilii A. Undalov¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3510-4523>

¹*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The purpose of this work is to compare the results of calculating the velocities of the flow around the ship's hull when it enters the lock chamber using various methods. The article presents the mathematical dependences obtained by various authors in the course of their research depending on the coefficient of constraint of the lock chamber by the ship's hull. An attempt to determine the influence of the height of the wave that arises in front of the stem in the process of entry which creates a slope of the water surface and the effect of this factor on the speed of the flowing stream is made. It was found that the values of the flow velocities calculated by various methods have discrepancies. And the methods themselves do not allow determining the speed of the flow around when large-tonnage vessels enter the lock chamber of an extremely small width. The authors proposed a simple

technique for calculating the flow velocity for cases of large values of the constraint coefficient using an auxiliary graph.

Keywords: constriction coefficient, static water reserve under the bottom of the vessel, shear wave height in front of the bow of the vessel, flow velocity.

Введение

Анализ теоретических, экспериментальных и натурных исследований показывает, что гидродинамические явления, возникающие в камерах шлюзов при проводке судов, аналогичны явлениям при движении судов в условиях ограниченного фарватера. Однако, следует учитывать, что на процесс проводки существенное влияние оказывает замкнутый объем жидкости в тупиковой области камеры. Под воздействием судна происходит вытеснение воды из камеры при вводе. При стеснении корпусом судна камеры шлюза более 50% расход потоков обтекания оказывается меньше объема вытесняемой судном жидкости. При этом перед форштевнем судна наблюдается подъем уровня воды. Вытесняемой судном жидкости сообщается кинетическая энергия, которая трансформируется в энергию потоков обтекания и потенциальную энергию объема воды в тупиковой области камеры. Часть энергии жидкости рассеивается на трение. Теоретических и экспериментальных данных о нестационарных процессах, обусловленных зонами отрыва при обтекании судовых профилей, в литературе встречается достаточно мало. Имеющиеся сведения и исследования обтекания потоком различных по форме тел позволяют сделать только качественную оценку нестационарных гидродинамических процессов, возникающих при обтекании корпуса судна. Возникает необходимость провести сравнение результатов расчётов скоростей потока обтекания корпуса судна при его заходе в камеру шлюза по различным методикам, а также определения влияния высоты волны, возникающей перед форштевнем в процессе захода, создающей уклон поверхности воды и влияние этого фактора на скорость обтекающего потока[9].

Анализ теоретических методов расчетов

Авторами работ [1-3] сформулирована задача о вводе судна в камеру шлюза. В постановке учитывается поршневой эффект судна, который рассматривается авторами как работа, производимая судном при движении в камере по типу своеобразной гидравлической машины, подводящей энергию жидкости и содействующей выжиманию ее из тупиковой области.

В общем случае, согласно закону сохранения массы, масса воды, протекающая через обтекания вдоль бортов судна можно воспользоваться уравнением неустановившегося безнапорного течения.

Если рассматривать область камеры шлюза перед форштевнем судна и область, стесненную корпусом судна, то для определения скорости воды, протекающей вдоль корпуса судна можно использовать уравнение Бернулли:

$$P + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = const \quad (1)$$

Если рассматривать горизонтальное движение без учета изменения уровня воды, (т.е. $\square = const$), то уравнение Бернулли можно записать следующим образом:

$$\frac{F}{\Omega_{\otimes}} + P_a + \frac{\rho v_1^2}{2} = \frac{\rho v_2^2}{2} + P_a \quad (2)$$

где P_a – атмосферное давление;

v_1 – скорость движения судна;

v_2 – скорость обтекающего потока;
 F – упор винтов.
 Из уравнения неразрывности следует:

$$\Omega_{\otimes} v_1 = S_2 v_2 \quad (3)$$

Где
 Ω_k – площадь водного сечения камеры шлюза;
 Ω_{\otimes} – площадь погруженной части мидельшпангоута судна;
 Решая совместно уравнения (2) и (3), получим:

$$\frac{F}{\Omega_{\otimes}} + \frac{\rho S_2^2 v_2^2}{2 \Omega_{\otimes}^2} = \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (4)$$

Отсюда:

$$v^2 = \sqrt{\frac{2F \Omega_{\otimes}}{\rho (\Omega_{\otimes}^2 - S_2^2)}} \quad (5)$$

Результаты модельных и натурных испытаний [1-3] показывают, что в момент входа в камеру шлюза, ввиду резкого сужения потока обтекания, наблюдается максимальное повышение уровня воды перед судном, возникает поперечная волна, что дополнительно увеличивает сопротивление воды и оказывает влияние на скорость движения судна.

Чем большую скорость имеет судно перед заходом в камеру шлюза и чем больше стеснение миделем судна живого сечения камеры шлюза, тем больше перепад уровней, больше сопротивление воды движению судна, скорость обтекания и динамическая просадка.

Причем на увеличение скорости, кроме сужения потока, влияет еще уклон, возникающий вследствие подъема уровня перед форштевнем (носовая волна) и опускания уровня из-за возникающего дифферента на корму.

В силу небольших значений скоростей судна можно полагать движение воды потенциальным. В таких течениях вращение частиц в среднем отсутствуют, т.е. все движение воды сводится к поступательному и деформационному.

Тогда скоростной характер течения можно представить в виде:

$$V = V_0 + S_v dl \quad (6)$$

где $S_v dl$ – скорость, называемая деформационным движением.

Данные модельных испытаний

В Московском филиале ЛИВТа были проведены обширные модельные гидравлические исследования проводки судов в шлюзах для ББК, ВВП, ВДСК и др. [2]. Большим достоинством этих исследований является то, что модель судна двигалась в камере своим ходом своим ходом (под действием винтовых движителей), а формирование водной поверхности определялась по 14 волномерам, установленным вдоль продольной стены камеры шлюза (рис1).

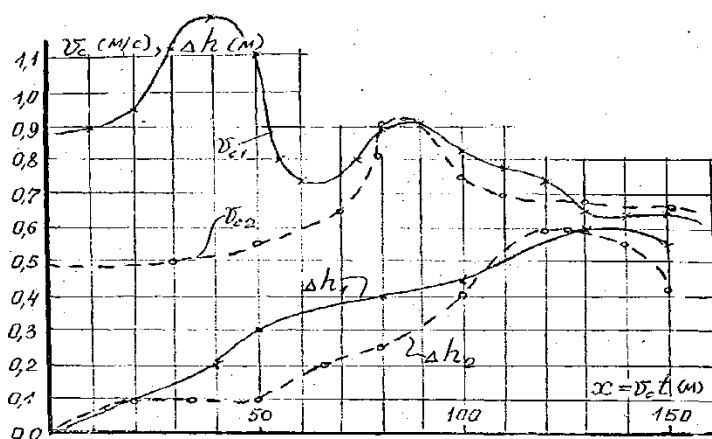


Рис.1 Изменения скорости судна и уровней воды при заходе в камеру шлюза
 Fig. 1 Changes in vessel speed and water levels when entering the lock chamber

На рис. 1 представлены случаи ввода судна в камеру шлюза. Для случая – V_{c1} средняя скорость движения $V_{cp} = 0,86\text{ м/с}$, для случая – V_{c2} средняя скорость движения $V_{cp} = 0,61\text{ м/с}$. Но максимальная величина колебания уровней воды в камере оказалась равной для этого случая характерно плавное уменьшение скорости движения судна и относительно плавное повышение уровня воды в камере с уклоном свободной поверхности воды в сторону судна.

Однако следует отметить, что приведенные данные получены для соотношения $H/T = 1,33$ (величина статического запаса воды под днищем судна при этом – в пределах 0,8-1,0 м)

Авторы статьи [1] предлагают для расчетов средних значений скоростей потока, обтекающего корпус судна при заходе в шлюз, воспользоваться формулой Шези:

$$V_{\text{пот}} = V_c + 1,1V_v \tag{7}$$

где V_c – скорость судна;

$V_v = C_o VRJ$ – скорость воды, обусловленная уклоном воды.

$C_o = \frac{1}{n_{\text{пр}}^{1/6}}$ – коэффициент сопротивления Шези;

$n_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент шероховатости стенок;

$R_z = \frac{\Omega_k - \Omega_{\otimes}}{w_k + w_c}$ – гидравлический радиус,

Ω_k – площадь водного сечения камеры шлюза;

Ω_{\otimes} – площадь погруженной части мидельшпангоута судна;

$(w_k + w_c)$ – суммарный смоченный периметр камеры шлюза и судна;

$J = tgf$ – уклон водной поверхности;

f – угол дифферента судна.

Уклон поверхности воды при заходе в шлюз определяется высотой волны, образующейся перед форштевнем судна. При этом полагалось, что уклон свободной поверхности воды соответствует уклону (дифференту судна).

Натурные наблюдения показывают, что при движении судна в камере дифферентные углы, как правило, не превышают 30' (т. е. $J = 0.008$).

В работе [2] рекомендовано определять подъем уровня воды в камере шлюза при заходе судна по выражению:

$$\Delta H = 0,24V_{\text{пот}}^{2,2} \tag{8}$$

Следует заметить, что данная зависимость в явном виде не учитывает степень стеснения.

В работе [3] С. С. Кирьяков величину скорости обтекающего потока в зависимости от уклона определял по формуле:

$$V_{\text{пот}} = \frac{\Omega_k V_c}{\Omega_k - \Omega_{\otimes} - \Delta H B_k} \quad (9)$$

Совместное решение уравнений (8) и (9) позволяет получить зависимость для определения потока обтекания с учетом стесненности камеры шлюза корпусом судна и скорости заходящего судна, в виде:

$$V_{\text{пот}} = \left(\frac{V_c \Omega_{\otimes}}{0,24 B_k (\Omega_k - \Omega_{\otimes})} \right)^{0,31} \quad (10)$$

Результаты значений скорости обтекающего потока по формуле (10) для случаев входа судна типа «Волго-Дон» при различной осадке в камеру шлюза шириной $B_k = 18\text{м}$ и глубиной $H_k = 3,9\text{м}$ приведены в табл.1.

С учетом полученных значений скоростей обтекания теперь можно определить величину подъема уровня воды перед форштевнем заходящего в шлюз судна по формуле (8).

В работе [5] авторами представлена графическая зависимость для определения максимального повышения уровня воды в виде функции от степени стеснения камеры шлюза корпусом судна и скорости захода, полученная с учётом натуральных наблюдений (рис.2).

Сравнительный анализ результатов показывает качественную сходимость результатов, полученных по зависимости (8) и по рис. 2.

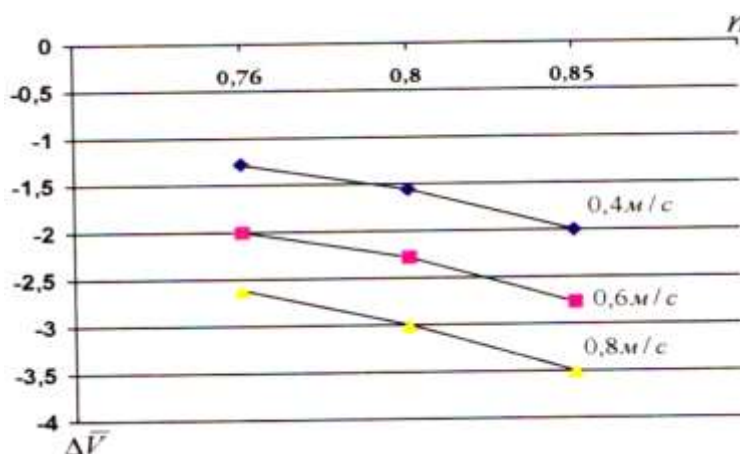


Рис.2. Графическая зависимость для определения максимального повышения уровня воды в виде функции от степени стеснения камеры шлюза корпусом судна и скорости захода, полученная с учётом натуральных наблюдений
 Fig. 2. Graphical dependence for determining the maximum increase in the water level as a function of the degree of restriction of the lock chamber by the ship's hull and the speed of entry, obtained taking into account field observations

В нормативном документе [4] средняя скорость потока обтекания относительно судна определяется по формуле:

$$v_1 = Fr_1 \sqrt{g \frac{\Omega}{B}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\alpha} \cos \frac{\pi + \phi}{3} \sqrt{g \frac{\Omega}{B}} \quad (11)$$

где $\alpha = Fr^2 + 2(1 - k)$; $\phi = \arccos \frac{3\sqrt{3}Fr}{\sqrt{\alpha^3}}$.

Значение Fr_1 в формуле (11) можно определить по графику на рис.3 при известном коэффициенте стеснения k и скорости движения судна.

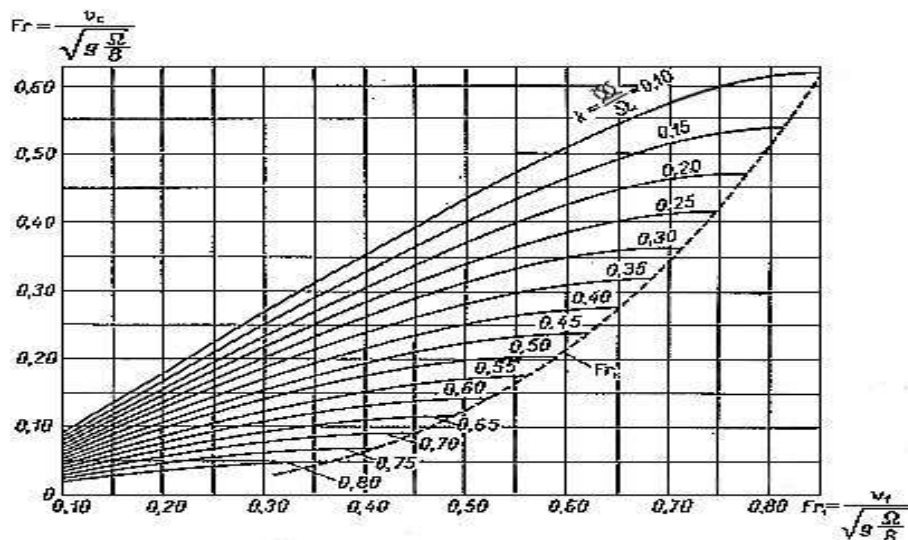


Рис.3. График для определения критической скорости движения судна и скорости потока обтекания относительно судна
 Fig. 3. Graph for determining the critical speed of movement the vessel and the flow rate of the flow relative to the vessel

Средняя скорость потока обтекания относительно шлюза равна:

$$v_6 = v_1 - v_c \tag{12}$$

где v_c - скорость движения судна, м/сек.

Однако следует отметить, что при значениях коэффициента стеснения более 0,8 вспомогательным графиком пользоваться нельзя.

В табл.1 приведены расчетные значения скоростей обтекания, полученные по вышеприведенным методикам для случая захода т/х «Волго-Дон» в камеру шлюза при больших значениях коэффициента стеснения.

Таблица 1

Значения скоростей обтекания потока

k	v_c , м/с	(5)	(7)	(10)	(11)
0,82	0,4	0,46	0,54	0,76	-
	0,6	0,65	0,74	0,87	-
	0,8	0,98	0,94	0,95	-
0,77	0,4	0,48	0,53	0,70	1,3
	0,6	0,68	0,73	0,80	-
	0,8	0,86	0,93	0,88	-
0,73	0,4	0,57	0,52	0,65	1,6
	0,6	0,73	0,72	0,74	-
	0,8	0,79	0,92	0,80	-

Выводы

Анализ результатов расчетов показывает, что значения скоростей обтекания, полученные по приведенным методикам, имеют некоторые различия между собой, что требует дополнительного исследования.

С учетом того, что натурные эксперименты требуют больших материальных затрат, а лабораторные исследования не позволяют качественно определить совместное влияние различных факторов, сопровождающих процесс захода судна в камеру шлюза и оказывающих влияние на динамическую картину обтекающего потока [15], наиболее предпочтительным в настоящее время можно считать математическое моделирование процесса. Кинематическую и динамическую структуру обтекающего потока можно получить путем численного решения уравнений Навье-Стокса с дополнением их граничными условиями [9,11].

Список литературы

1. Мелконян Г.И., Дорوفеев В.В. Гидравлическое исследование процесса ввода судна в шлюз/ Тр. ЛИВТ, 1971г., ч.1, с.33-43
2. Зернов Д.А., Кирьяков С.С. Пропуск крупнотоннажных судов через шлюзы ББК.- «Речной транспорт». 1967, №5.
3. Кирьяков С.С. Исследование дополнительных осадок и скоростей при входе и выходе судов в шлюзах.//Диссертация на соискание степ. к.т. н. ЛИВТ/-Л.;1971.- 245 с.
4. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. СНиП 2.06.01-86.с.29
5. Васянин А. Д., Клементьев А. Н. Исследование и моделирование особенностей процесса захода судна в камеру шлюза./ Вестник ВГАВТ, 2009.-Вып.26,с.31-34
6. Временные строительные нормы. Указания по проектированию судоходных каналов. Пр. Минречфлота РСФСРВСН 3-70. Утв.01.01.1972г.
7. Результаты лабораторных исследований движения судна в сверхограниченных фарватерах / В.И. Похабов. – Текст : непосредственный //Сборник научных трудов МИИВТа. Серия: «Повышение надежности механического оборудования судоходных гидротехнических сооружений». –1996. – №10. –С.139-159.7.
8. Экспериментальные лабораторные исследования ввода и вывода судов в камерах судопропускных сооружений / С.С. Кирьяков, В.И. Похабов, С.Ю. Третьяк. – Текст: непосредственный //Сборник научных трудов МИИВТа. Серия: «Эксплуатация водных путей и гидротехнических сооружений. –1992. – №11. –С.42-69.
9. Harlow, F.H. Numerical calculation of time – dependent viscous incompressible flows of fluid with free surface / F.H. Harlow, J. E. Welch, //-Phys, Fluids, 1982, №8 pp.2182-2187
10. Helm K. Einfluss der verchiedenenFlachwasser profile auf Wieldsnand und Vorieb von BinnenshifienmitRechnungsbeispiele fur die Bind wasserstrasje der klasse IV «Hansa» Zentralorgan fur Schiffahrt. Schiff hafen. Hamburg. Nr. II. 1965.
11. Rodi, W. Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale /Rodi, W. //Proc.2nd Symp. on Turbulent Shear Flows- 1979, v. 1 pp. 25-31
12. Tothill I. T.Ships in rectricted channels. A correlation of more tests, field measurements and theory, Ottava, 1966.
13. Schale E. Stromungsmessungen in einem Stillwassercanal trap formigen Querschnitts. «Schiff und Hafen». Н 5,1968,20
14. FuehrerM. Der Einflussderortlichen Stromungsverhältnisse Umgedungvon Schifftenauf diewechselbeziehungenzwischen Schiffon Kanal. «SchriftenzelneWasserundGrundbau». Н., II Berlin. 1964.
15. Windsor I. Hydraulic assistance on the Welland schip. Waterways and Harbjrs Div. Proc. Civil Engrs. No.1, 1968, p. 94

References

1. Melkonyan G.I., Dorofeev V.V. Hydraulic study of the process of entering a ship into the lock / Tr. LIVT, 1971, part 1, pp. 33-43
2. Zernov D.A., Kiryakov S.S. Passage of large-tonnage vessels through the BBC locks // River transport, 1967, No. 5.

3. Kiryakov S.S. Investigation of additional drafts and speeds at the entrance and exit of ships in locks. // Dissertation for the step. Ph. D. n. LIVT /L.: 1971. 245 p.
4. Hydraulic structures. The main provisions of the design. Building Code 2.06.01/86.p.29
5. Vasyanin A. D., Klement'ev A. N. Research and modeling of the peculiarities of the process of entering the lock chamber // Bulletin of VSAWT, 2009. Issue 26, pp.31-34.
6. Temporary building codes. Guidelines for the design of shipping channels. Etc. Ministry of River Fleet of the RSFSR Building Norms 3-70. Approved 01.01.1972.
7. Rezul'taty laboratornykh issledovaniy dvizheniya sudna v sverhgranichennykh farvaterah / V.I. Pohabov. – Tekst :neposredstvennyj //SborniknauchnyhtrudovMIIVTa. Seriya: «Povyshenie nadezhnosti mekhanicheskogo oborudovaniya sudohodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij». –1996. – №10. –S.139-159.
8. Eksperimental'nye laboratornye issledovaniya vvoda i vyvoda sudov v kamerah sudopropusknykh sooruzhenij / S.S. Kir'yakov, V.I. Pohabov, S.YU. Tretyak. – Tekst :neposredstvennyj //Sbornikn auchnyh trudov MIIVTa. Seriya: «Ekspluatsiya vodnykh putej i gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. – 1992. – №11. –S.42-69.
9. Harlow, F.H. Numerical calculation of time – dependent viscous incompressible flows of fluid with free surface / F.H. Harlow, J. E. Welch, // Phys. Fluids, 1982, №8 pp.2182-2187
10. Helm K. Einfluss der verschiedenenFlachwasser profile auf Wielsndand und Vorieb von BinnenschiffenmitRechnungsbeispiele fur die Bind wasserstrasse der klasse IV «Hansa» Zentralorgan fur Schifffahrt. Schiff haf. Hamburg. Nr. II. 1965.
11. Rodi, W. Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale /Rodi, W. //Proc.2ndSymp. on Turbulent Shear Flows. 1979, v. 1 pp. 25-31
12. Schale E. Stromungsmessungen in einem Stillwassercanal trap formigen Querschnitts. «Schiff und Hafen». H 5,1968,20
13. Tothill I. T.Ships in rectricted channels. A correlation of more tests, field measurements and theory, Ottava, 1966.
14. FuehrerM. Der Einflussderortlichen Stromungsverhaltnisse Umgedungvon Schifftenauf diewechselbeziehungenzwischen Schiffon Kanal. «SchriftenzelneWasserundGrundbau». H., II Berlin. 1964.
15. Windsor I. Hydraulic assistance on the Welland schip. Waterways and Harbjrs Div. Proc. Civil Engrs. No.1, 1968, p. 94

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Зубкова Евгения Владимировна, аспирант кафедры судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_sbs@vsuwt.ru

Evgenia V. Zubkova, Graduate student of the Department of navigation and safety shipping, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterovst, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: kaf_sbs@vsuwt.ru

Клементьев Александр Николаевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_sbs@vsuwt.ru

Alexander N. Klementev, Tech Scs.Dr., Professor of the Department of navigation and safety shipping, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterovst, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: kaf_sbs@vsuwt.ru

Ундалов Василий Александрович, аспирант кафедры судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_sbs@vsuwt.ru

Vasilii A. Undalov, Graduate student of the Department of navigation and safety shipping, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterovst, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: kaf_sbs@vsuwt.ru

Статья поступила в редакцию 25.04.2021; опубликована онлайн 15.06.2021
Received 25.04.2021; published online 15.06.2021