

УДК 532:639.2

О ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛОСКОЙ СЕТИ ОТ УГЛА АТАКИ

В. А. Наумов, Н. Р. Ахмедова, И. М. Ахмедов

DEPENDENCE OF HYDRODYNAMIC DRAG COEFFICIENT OF A FLAT  
NETWORK ON THE ATTACK ANGLE

V. A. Naumov, N. R. Akhmedova, I. M. Akhmedov

Коэффициент гидродинамического сопротивления плоской сети служит основой для расчета сил, действующих на сетные орудия рыболовства. Проанализированы опубликованные эмпирические формулы, описывающие зависимость этого коэффициента от угла атаки. Известно много эмпирических формул, полученных при анализе экспериментальных данных, справедливых лишь в узком диапазоне параметров. Предложено использовать при анализе понятие приведенного коэффициента гидродинамического сопротивления плоской сети – отношение разности коэффициентов гидродинамического сопротивления при произвольном угле атаки и при нулевом угле атаки к разности коэффициентов, взятых при поперечном и продольном обтекании. Показано, что большинство используемых универсальных формул, справедливых во всем диапазоне углов атаки  $\alpha$ , представляют собой степенную функцию синуса угла  $\alpha$ . Диапазон рекомендуемых значений показателя степени  $n$  в опубликованных работах варьируется от 0,8 до 2,5. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами расчета приведенного коэффициента гидродинамического сопротивления плоской сети при различных значениях показателя степени. Если принимать во внимание весь диапазон углов атаки (от нуля до  $90^\circ$ ), то наименьшее среднеквадратическое отклонение отмечено при  $n = 0,65$ . Полученное значение показателя степени нельзя считать окончательным. Требуется проверка по данным опытов других авторов, а также проведение контрольных экспериментов.

*плоская сеть, угол атаки, гидродинамические силы, коэффициент сопротивления, эксперименты, эмпирические формулы*

The hydrodynamic drag coefficient of a flat network is the basis for the calculation of the forces acting on fishing gears. Published empirical formulas describing the dependence of the hydrodynamic drag coefficient of a flat network on the attack angle have been analyzed. There are many empirical formulas obtained from the analysis of experimental data, which are only true in a narrow range of parameters. It has been proposed to use in the analysis of the concept of the modified hydrodynamic drag coefficient in a flat network. It is the difference in the hydrodynamic drag coefficient at arbitrary attack angle and at zero attack angle to the difference of the coefficients, taken in the transverse and longitudinal flow. It is shown that the most used generic formulas, equitable across the range of attack angles  $\alpha$  represents a power function of the angle  $\alpha$  sine. Recommended values of the factor  $n$  in the published work range from 0.8 to 2.5. The comparison of experimental data with calculation results of the modified drag coef-

efficient of a flat network for different values of the exponent is performed. If we take into account the entire range of attack angles (from zero to 90 degrees), the smallest standard deviation is obtained for  $n = 0,65$ . The obtained value of the exponent cannot be considered to be final. Verification is required according to the experiments of other authors, as well as conducting control experiments.

*flat network, attack angle, hydrodynamic forces, drag coefficient, experiments, empirical formula*

В [1-3] и многих других источниках указано, что рыболовные сети в промысловых условиях практически не бывают плоскими. Их коэффициент гидродинамического сопротивления зависит от так называемого провиса. Последнее утверждение, несомненно, справедливо для интегрального коэффициента, рассчитанного для всей (или хотя бы заметной части) рыболовной сети. В данной статье речь пойдет о локальном коэффициенте гидродинамического сопротивления сети, когда ее площадь достаточно мала (математически – стремится к нулю). Указанный коэффициент служит основой для расчета сил гидродинамического сопротивления, действующих на сетные орудия рыболовства.

Сила гидродинамического сопротивления, действующая на плоскую рыболовную сеть, рассчитывается по формуле

$$R_x = 0,5 \cdot C_x^o \cdot F_H \cdot \rho \cdot V^2 = 0,5 \cdot C_x \cdot F \cdot \rho \cdot V^2, \quad C_x^o = F_0 C_x, \quad (1)$$

где  $F$  – габаритная площадь сети;  $F = Lb$ ,  $L$  – длина сети,  $b$  – ширина сети;  $F_H$  – площадь нитей в плане;  $F_0 = F_H / F$  – относительная площадь нитей;  $\rho$  – плотность воды;  $V$  – скорость;  $C_x$  – коэффициент гидродинамического сопротивления при угле атаки  $\alpha$ .

В данной статье ограничимся автотомельной областью сопротивления: число Рейнольдса достаточно велико, чтобы можно было пренебречь зависимостью  $C_x$  от него.

Известно много эмпирических формул, полученных при анализе экспериментальных данных в узком диапазоне параметров. Например, в [4] А. В. Дверником на основании проведенных опытов предложена следующая формула, справедливая при условиях  $Re = 10^3 \div 10^4$ ,  $F_0 = 0,04 \div 0,3$  и  $\alpha = 6^\circ \div 14^\circ$  ( $k = 0,04$  град<sup>-1</sup> – размерный коэффициент):

$$C_x = k \cdot \alpha - 0,09. \quad (2)$$

В [5] для сети с коэффициентом посадки  $u_s = 0,707$  при углах атаки  $15^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  получена эмпирическая формула, которая после несложных преобразований принимает вид (угол атаки сети  $\alpha$  подставляют в радианах):

$$C_x = 0,8 \cdot (d/a) \cdot \ln(11\alpha), \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр нити;  $a$  – шаг ячеи сетного полотна.

Далее будем рассматривать только универсальные формулы, справедливые во всем диапазоне углов атаки  $\alpha$ . Самой простой из таких зависимостей будет линейная, приведенная, например, в [3]:

$$C_x = C_0 + (C_{90} - C_0) \cdot (\alpha / 90^\circ), \quad (4)$$

где  $C_0$ ,  $C_{90}$  – коэффициент гидродинамического сопротивления плоской сети при угле атаки  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$  соответственно.

Формула (3) качественно согласуется с физическим смыслом задачи:  $C_x(0^\circ) = C_0$ ,  $C_x(90^\circ) = C_{90}$ ; при  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$   $C_x(\alpha)$  является возрастающей функцией

угла атаки. Но количественного согласия с экспериментальными данными нет, в частности, не выполняется требование уменьшения производной функции  $C_x(\alpha)$  с ростом угла атаки. Указанному требованию отвечает широко используемая (см., например, [6,7]) формула А. С. Ревина [8]:

$$C_x = C_0 + (C_{90} - C_0) \cdot \sin \alpha. \quad (5)$$

В [9] было предложено использовать формулу, по сути, аналогичную (5). Правда, чтобы это понять, необходимо исправить опечатку и учесть, что в [9] принято:

$$C_{90} = \left(\frac{d}{a}\right) - 1,24 \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2 + 13,7 \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^3, \quad C_0 = 0,04.$$

Анализ научных публикаций, показал, что (5) не является единственной универсальной формулой, соответствующей условиям рассматриваемой задачи. Так, если исправить явную опечатку в [10], получим

$$C_x = C_0 \cdot \cos^2 \alpha + C_{90} \cdot \sin^2 \alpha. \quad (6)$$

Равенство (6) с помощью несложных преобразований приводится к следующему виду:

$$C_x = C_0 \cdot (1 - \sin^2 \alpha) + C_{90} \cdot \sin^2 \alpha = C_0 + (C_{90} - C_0) \cdot \sin^2 \alpha. \quad (7)$$

Видно, что (7) отличается от (5) только степенью синуса. Для удобства дальнейшего изложения определим приведенный коэффициент гидродинамического сопротивления так:

$$c_x = (C_x - C_0) / (C_{90} - C_0) = \sin^n \alpha. \quad (8)$$

В [11] на основании анализа опытных данных было предложено считать, что величина коэффициента гидродинамического сопротивления прямо пропорциональна синусу угла атаки в степени  $n = 2,5$ .

В [12] приведены результаты экспериментального исследования гидродинамического сопротивления пяти образцов полиэтиленовых сетей, закрепленных за верхнюю подбурю. Посадочный коэффициент сети  $u_x = 0,707$ . Согласно [10] коэффициент сопротивления сети зависит от синуса угла атаки в степени  $n = 0,8$ .

В данной работе выполним анализ экспериментальных данных [13] зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления плоской сети от угла атаки, чтобы установить величину степени синуса  $n$  в формуле (8). Воспользуемся результатами измерений [13] гидродинамического сопротивления плоской сети с диаметром нити  $d = 1,45$  мм; шагом ячеей  $a = 30$  мм при скоростях набегающего потока, указанных в таблице.

Таблица. Эмпирические константы в формуле (8)

Table. Empirical constants in equation (8)

№ п/п	$V_i$ , м/с	$Re_i$	$n_i$	$n_{1i}$	$n_{2i}$	$\varepsilon_i$ , %
1	0,3	426	0,773	0,673	0,873	6,5
2	0,4	569	0,609	0,401	0,816	13,0
3	0,5	711	0,683	0,552	0,815	8,4
4	0,6	854	0,610	0,445	0,775	10,2
5	0,7	995	0,638	0,584	0,712	4,8
6	0,8	1137	0,608	0,494	0,723	7,5

Коэффициент кинематической вязкости воды в опытах был  $\nu = 1,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Вычислим сплошность сети  $F_0$  и числа Рейнольдса:

$$F_0 = \frac{d}{a} \cdot \frac{1}{u_x \cdot u_y} = 0,1, \quad Re_i = \frac{d \cdot V_i}{\nu}, \quad (9)$$

где посадочные коэффициенты сети  $u_x = 0,6$ ;  $u_y = 0,8$ .

На рис. 1 видно, что дальше всего отстоят от опытных данных результаты расчета по формулам (4) и (8) при  $n = 2$ . С уменьшением степени  $n$  до 0,8 кривая 6 расположена уже ближе к экспериментальным точкам, но все еще недостаточно. Можно предположить, что для согласия результатов расчета с данными опытов [13] величина показателя степени в формуле (8) должна быть несколько меньше 0,8.

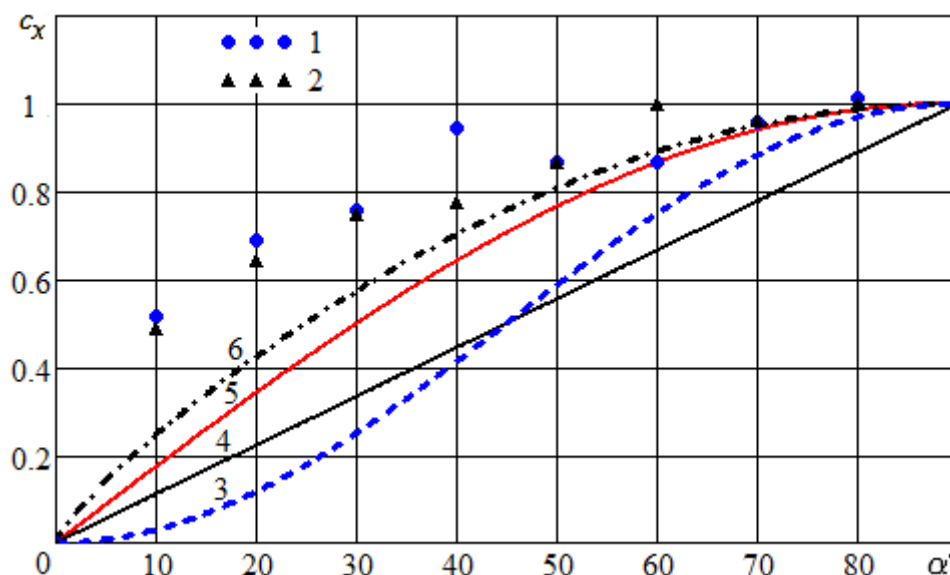


Рис. 1. Зависимость приведенного коэффициента гидродинамического сопротивления плоской сети от угла атаки. Точки – опытные данные [13]:

1 –  $Re = 854$ ; 2 –  $Re = 995$ . Линии – результаты расчета: 3 – по формуле (8) при  $n = 2$ ; 4 – по формуле (4); 5 – по формуле (8) при  $n = 1$ ; 6 – по формуле (8) при  $n = 0,8$

Fig. 1. The dependence of the modified hydrodynamic drag coefficient of a flat network on the attack angle. Points are experimental data [13]: 1 –  $Re = 854$ ; 2 –  $Re = 995$ . Lines are the results of the calculation: 3 – by the formula (8)  $n = 2$ ; 4 – by the formula (4); 5 – by the formula (8)  $n = 1$ ; 6 – by the formula (8)  $n = 0,8$

Показатели степени  $n_i$  в таблице определяли методом наименьших квадратов для каждой реализации случайной функции. Результаты расчета по формуле (8) с найденными значениями степеней представлены на рис. 2.

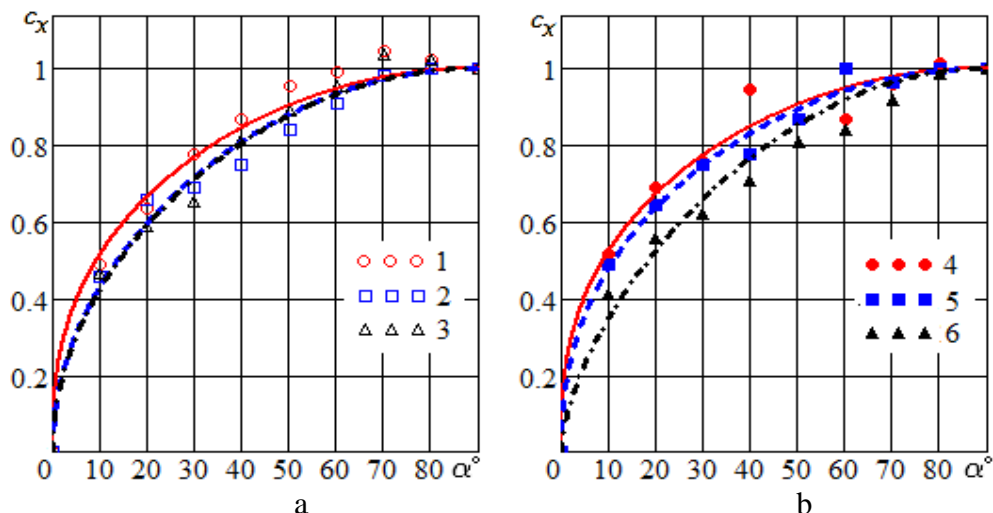


Рис. 2. Зависимость приведенного коэффициента гидродинамического сопротивления плоской сети от угла атаки. Линии – результаты расчета по формуле (8), точки – опытные данные [13]: а) 1 –  $Re = 426$ ; 2 –  $Re = 569$ ; 3 –  $Re = 711$ ; б) 4 –  $Re = 854$ ; 5 –  $Re = 995$ ; 6 –  $Re = 1137$

Fig. 2. The dependence of the modified hydrodynamic drag coefficient of a flat network on the attack angle. Lines are the results of the calculation by the formula (8), points are experimental data [13]: 1 –  $Re = 426$ ; 2 –  $Re = 569$ ; 3 –  $Re = 711$ ; 4 –  $Re = 854$ ; 5 –  $Re = 995$ ; 6 –  $Re = 1137$

В таблице  $n_{1i}$ ,  $n_{2i}$  – нижняя и верхняя границы доверительного интервала показателя степени (рис. 3). При сглаживании каждой реализации вычисляли относительную среднюю квадратическую погрешность аппроксимации (в процентах) по формуле

$$\varepsilon_i = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{9-2} \cdot \sum_{j=2}^{10} (\sin^{n_i} \alpha_j - c_{xj})^2} . \quad (10)$$

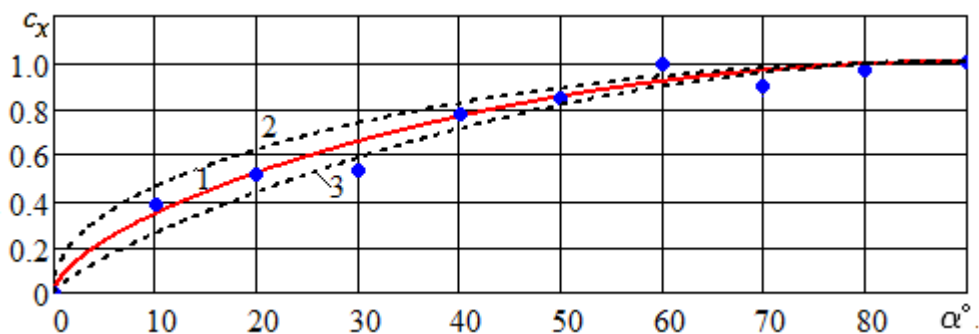


Рис. 3. Зависимость приведенного коэффициента гидродинамического сопротивления плоской сети от угла атаки при  $Re = 426$ . Точки – опытные данные [13]; 1 – результат расчета по формуле (8) при  $n = 0,773$ ; 2 и 3 – границы доверительного интервала кривой 1

Fig. 3. Dependence of the modified hydrodynamic drag coefficient of a flat network on the attack angle at  $Re = 426$ . Points are experimental data [13]; 1 – the result of the calculation by the formula (8) for  $n = 0,773$ ; 2 and 3 – the borders of the confidence interval of the curve 1

По таблице видно, что погрешность аппроксимации составляет от 4,8 до 13 %; доверительные интервалы показателей степени для всех реализации перекрываются. Следовательно, можно считать, что все реализации принадлежат одной случайной функции. Кроме того, при увеличении  $Re$  изменения рассчитанных значений показателя степени  $n_i$  носят случайный характер, скорее всего, обусловленный погрешностями измерений.

По данным таблицы найдем среднее значение показателя степени в формуле (7), которое может быть рекомендовано для расчетов гидродинамического сопротивления плоской сети:

$$\bar{n} = \sum n_i / 6 \approx 0,65.$$

Полученное значение показателя степени нельзя считать окончательным. Требуется проверка по данным опытов других авторов, а также проведение контрольных экспериментов.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баранов, Ф. И. Техника промышленного рыболовства / Ф. И. Баранов. – Москва: Пищепромиздат, 1960. - 695 с.
2. Белов, В. А. Гидродинамика нитей, сетей и сетных конструкций: монография / В. А. Белов. - Калининград: Изд-во КГТУ, 2000. - 201 с.
3. Розенштейн, М. М. Механика орудий рыболовства: учебник / М. М. Розенштейн, А. А. Недоступ. – Москва: Моркнига, 2011. – 527 с.
4. Дверник, А. В. Совершенствование методики расчета сопротивления рыболовного трала: дис. канд. техн. наук / Дверник Александр Васильевич. - Калининград: Изд-во КТИРПХ, - 1971. - 255 с.
5. Yoichi, O. On the experimental apparatus for measurement of hydraulic resistance of plain net and result of the experiment determined by the apparatus / O. Yoichi, K. Mori, Y. Tawara // Bulletin of national research institute of fisheries engineering. - 1982. - V.57. - No.3. - P. 227-238.
6. Наумов, В. А. Математическая постановка краевой задачи о равновесии полосы сети ставного невода / В. А. Наумов // Известия КГТУ. – 2013. – № 28. – С. 182-187.
7. Наумов, В. А. К расчету равновесия полосы донной сети в автомобильной области сопротивления / В. А. Наумов, Н. А. Агиевич // Известия КГТУ. – 2014. – № 33. – С. 29-35.
8. Ревин, А. С. Исследование влияния структуры и формы траловой сети на ее сопротивление в воде / А. С. Ревин // Сборник научных трудов ВНИРО. - 1959. - Т. 41. - С. 66-82.
9. Aarsnes, J. V. Current forces on cage, net deflection / J. V. Aarsnes, H. Rudi, G. Loland // Engineering for offshore fish farming. – London: Thomas Telford, 1990. - P. 137-152.
10. Kawakami, T. The theory of designing and testing fishing nets in model // Modern fishing gear of the World / T. Kawakami. – London: Fishing News Books, 1964. - P. 471-482.

11. Imai, T. Basic studies on the plane net set the flowing water - IV: Comparative study of hydro-dynamical resistance on knotted and knotless nettings / T. Imai. Mem. Fac. Fish., Kagoshima Univ., 1979. - P. 1276-1282.
12. Kim, S-J. Analysis on the curvatures of weighted netting in flow field / S-J. Kim, T. Imai, H. Kikukawa // Nippon Suisan Gakkaishi. - 1991. - № 57. - P. 403-408.
13. Song, D. H. Experimental investigation on the hydrodynamic coefficients of netting / D. H. Song, C. W. Lee, M. Y. Choe, I. H. Lee, K. H. Park // Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. DEMaT-2009. Nara, Japan. – P. 77-94.

## REFERENCES

1. Baranov F. I. *Tehnika promyshlennogo rybolovstva* [Commercial fishery engineering]. Moscow, Pishhepromizdat, 1960, 695 p.
2. Belov V. A. *Gidrodinamika nitej, setej i setnyh konstrukcij: monografija* [Hydrodynamics of threads, nets and net constructions: monograph]. Kaliningrad: Izd-vo KGTU, 2000, 201 p.
3. Rozenshtejn M. M., Nedostup A.A. *Mehanika orudij rybolovstva: ucheb-nik* [Fishing gear mechanics: student's book]. Moscow, Morkniga, 2011, 527 p.
4. Dvernik A. V. *Sovershenstvovanie metodiki rascheta soprotivlenija rybolovnogo trala. Diss. ... kandidata tehniceskikh nauk* [Perfection of calculation method of trawl net resistance. Dis. cand. techn. sci.]. Kaliningrad, KTIRPH, 1971, 255 p.
5. Yoichi O., Mori K., Tawara Y. On the experimental apparatus for measurement of hydraulic resistance of plain net and result of the experiment determined by the apparatus. Bulletin of national research institute of fisheries engineering. 1982, vol. 57, no. 3, p.p 227-238.
6. Naumov V. A. Matematicheskaja postanovka kraevoj zadachi o ravnovesii poloski seti stavnogo nevoda [Mathematical statement of the boundary problem on the balance of a fixed gill net]. *Izvestija KGTU*, 2013, no. 28, pp. 182-187.
7. Naumov V. A., Agievich N. A. K raschetu ravnovesija poloski donnoj seti v avtomodel'noj oblasti soprotivlenija [On the calculation of a fixed gill net balance in avtomodel resistance area]. *Izvestija KGTU*, 2014, no. 33, pp. 29-35.
8. Revin A. S. Issledovanie vlijanija struktury i formy tralovoj seti na ee soprotivlenie v vode [Influence of structure and form of a trawl net on its resistance in water]. *Sb. nauch. trudov VNIRO*, 1959, vol. 41, pp. 66-82.
9. Aarsnes J. V., Rudi H., Loland G. Current forces on cage, net deflection. Engineering for offshore fish farming. London: Thomas Telford, 1990, pp. 137-152.
10. Kawakami T. The theory of designing and testing fishing nets in model. Modern fishing gear of the World. London: Fishing News Books, 1964, pp. 471-482.
11. Imai T. Basic studies on the plane net set the flowing water - IV: Comparative study of hydro-dynamical resistance on knotted and knotless nettings. Mem. Fac. Fish., Kagoshima Univ., 1979, pp. 1276-1282.
12. Kim S-J., Imai T., Kikukawa H. Analysis on the curvatures of weighted netting in flow field. Nippon Suisan Gakkaishi. 1991, no. 57, pp. 403-408.
13. Song D. H., Lee C. W., Choe M. Y., Lee I. H., Park K. H. Experimental investigation on the hydrodynamic coefficients of netting. Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. DEMaT-2009. Nara, Japan, pp. 77-94.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Наумов Владимир Аркадьевич* – Калининградский государственный технический университет; доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования; E-mail: van-old@rambler.ru

*Naumov Vladimir Arkadievich* – Kaliningrad State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of water resources and water management; E-mail: van-old@rambler.ru

*Ахмедова Наталья Равиловна* – Калининградский государственный технический университет; кандидат биологических наук, заместитель декана факультета промышленного рыболовства; E-mail: isfendi@mail.ru

*Akhmedova Natalia Ravilovna* – Kaliningrad State Technical University; Deputy Dean of the Department of commercial fisheries; E-mail: isfendi@mail.ru

*Ахмедов Исфендияр Махмуд-оглы* – Калининградский государственный технический университет; аспирант кафедры водных ресурсов и водопользования

*Akhmedov Isfendiar Makhmud-ogly* – Kaliningrad State Technical University; Postgraduate student of the Department of water Resources and water Management