Научная статья
УДК 532.582:532.527:639.2.081.117

ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ВОДОТОКА НА РАВНОВЕСИЕ ПОЛОСКИ ДОННОГО НЕВОДА

Е.Д. Проскурнин[1,*]

[1] Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия
[*] E-mail: proskurnin@inbox.ru

Аннотация. В статье обоснована необходимость учета уменьшения скорости воды вблизи дна при расчетах сил гидродинамического сопротивления, действующих на донный невод. Поставленная краевая задача решена численным методом в среде Mathcad. Показано, что на верхнюю часть донного невода действуют большие силы гидродинамического сопротивления, так как она находится в области повышенных скоростей воды. Поэтому локальные углы атаки уменьшаются при уменьшении числа Шези (увеличении шероховатости русла водотока). Нормальные силы гидродинамического сопротивления, действующие на нижнюю часть донного невода, уменьшаются. У зависимости касательных сил гидродинамического сопротивления появляется максимум.

Ключевые слова: *водоток; профиль скорости; донный невод; полоска сети; гидродинамическое сопротивление; краевая задача.*

Для цитирования: Проскурнин Е.Д. Влияние профиля скорости водотока на равновесие полоски донного невода // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2025. Т. 11. № 3. С. 36–44.

Original article

THE EFFECT OF LANDING COEFFICIENTS ON THE HYDRODYNAMIC DRAG OF A FLAT NETTING DURING TRANSVERSE FLOW

E.D. Proskurnin[1,*]

[1] Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia
[*] E-mail: proskurnin@inbox.ru

Abstract. The article substantiates the need to take into account the decrease in water velocity near the bottom when calculating the hydrodynamic resistance forces acting on the bottom seine. The boundary value problem is solved numerically in the Mathcad environment. It is shown that large hydrodynamic resistance forces act on the upper part of the bottom seine, since it is located in the region of increased water velocities. Therefore, local attack angles decrease with a decrease in the Chezy number (increase in the roughness of the watercourse bed). The normal hydrodynamic resistance forces acting on the lower part of the bottom seine decrease. A maximum appears in the dependence of the tangential hydrodynamic resistance forces.

Keywords: *watercourse; velocity profile; bottom seine; net strip; hydrodynamic resistance; boundary value problem.*

For citation*:* Proskurnin E.D. The effect of landing coefficients on the hydrodynamic drag of a flat netting during transverse flow. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11, No. 3, pp. 36–44.

© Проскурнин Е.Д. 2025

Введение

Проектирование канатно-сетных орудий рыболовства невозможно без расчета их гидродинамического сопротивления [1-3]. В современных методах исследований обтекания рыболовных сетей привлекаются численные методы решения системы уравнений Навье-Стокса [2-5]. Однако в инженерных методах расчета по-прежнему используются полуэмпирические модели.

В Калининградском государственном техническом университете (КГТУ) была разработана полуэмпирическая теория расчета сил, действующих в канатно-сетных элементах орудий рыболовства. В [6-8] была разработана полуэмпирическая модель для силы гидродинамического сопротивления плоской рыболовной сети при поперечном, а в [9] – при продольном обтекании. В [10] была рассмотрена краевая задача о равновесии полоски сети ставного невода. В [11, 12] было исследовано влияние эластичности на форму и усилия в канатах из полимерных материалов при их обтекании. В [13] были скорректированы функции, аппроксимирующие коэффициенты гидродинамического сопротивления сетей, чтобы избежать разрывов этих функций.

Заметим, что во всех перечисленных публикациях скорость набегающего потока по глубине считается постоянной. Тогда как в действительности она может заметно изменяться. В [14] этот эффект был учтен, но только для плавучего тела, закрепленного канатом на дне водотока.

Цель данной статьи – исследование влияния изменения скорости по глубине водотока на форму и усилия в полоске донного невода.

Материалы и методы

В научной и учебной литературе приводится большое количество аналитических выражений изменения скорости водотока на вертикали, вполне удовлетворительно соответствующих опытными данными. Формула для профиля скорости водотока на вертикали, широко используемая при гидродинамическом анализе русловых потоков[1]:

$$V(Z) = V_n \sqrt{1 - \theta \cdot \left(\frac{Z}{H}\right)^2}, \quad \theta = 0{,}57 + \frac{3{,}3}{C}, \tag{1}$$

где Z – расстояние от поверхности водотока; V_n – скорость воды на поверхности; H – глубина водотока; C – коэффициент Шези. Ограничимся пределами изменения C от 8 до 60 м^{0,5}/с.

Проинтегрируем (1), найдем среднюю скорость воды на вертикали, как в [14]:

$$V_{cp} = \frac{1}{H}\int_0^H V(Z)\, dZ = \frac{V_n}{2\sqrt{\theta}}\left[\arcsin\left(\sqrt{\theta}\,\frac{Z}{H}\right) + \sqrt{\theta}\,\frac{Z}{H}\sqrt{1 - \theta\cdot\left(\frac{Z}{H}\right)^2}\right]_0^H. \tag{2}$$

По формуле (2) найдем зависимость отношения поверхностной к средней скорости от величины θ

$$vs(\theta) = \frac{V_n}{V_{cp}} = \frac{1}{2\sqrt{\theta}}\left[\arcsin\sqrt{\theta} + \sqrt{\theta\cdot(1-\theta)}\right]. \tag{3}$$

Подставляя (3) в (1), получим формулу для безразмерной скорости воды на вертикали, как функцию y и θ,

[1] Чеботарев А.И. Общая гидрология (воды суши): учебник. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 544 с.

$$v(y,\theta)=\frac{V}{V_{cp}}=vs(\theta)\sqrt{1-\theta\cdot(1-y)^2}\,, \qquad (4)$$

где $y = 1 – Z/H$ – безразмерное расстояние от дна водотока.

По рис. 1 видно, что при меньших значениях C (большем гидравлическом сопротивлении русла) неравномерность профиля скорости воды на вертикали больше.

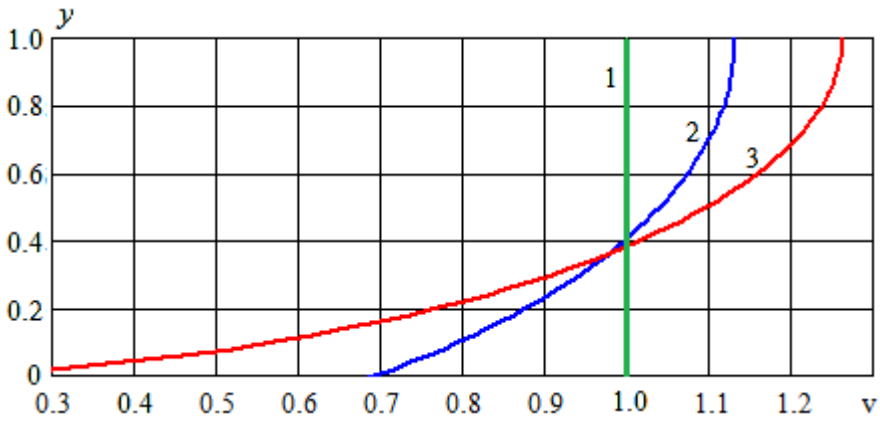


Рисунок 1 – Профиль безразмерной скорости водотока на вертикали по формуле (4):
1 – v=const, 2 – C = 60 м^{0,5}/с; 3 – C = 8 м^{0,5}/с

Уравнения равновесия полоски сети в проекциях на нормальную и касательную оси запишем аналогично [10]:

$$T\frac{d\alpha}{dS}+q\cdot\cos\alpha+R_n=0\,,\quad \frac{dT}{dS}+q\cdot\sin\alpha-R_\tau=0\,. \qquad (6)$$

где T – величина локальной силы натяжения; R_n и R_τ – соответственно, нормальная и касательная составляющих силы гидродинамического сопротивления; проекции внешних сил на нормальную и касательную оси, соответственно; S – дуговая координата, отсчитываемая от точки крепления на дне.

Величины составляющих силы гидродинамического сопротивления вычисляем с учетом изменения скорости воды на вертикали, как в [14]:

$$R_n(\alpha,y)=\frac{\rho\cdot d}{2}\left(V(y)\right)^2\left[C_0+(C_{90}-C_0)\cdot\sin\alpha+\cos^2\alpha\sin\alpha\right]\cdot\sin\alpha\,, \qquad (7)$$

$$R_\tau(\alpha,y)=\frac{\rho\cdot d}{2}\left(V(y)\right)^2\left[C_0+(C_{90}-C_0)\cdot\sin\alpha-\sin^2\alpha\sin\alpha\right]\cdot\cos\alpha\,, \qquad (8)$$

Коэффициенты гидродинамического сопротивления при поперечном C_{90} и продольном C_0 обтекании в [14] были приняты постоянными, как у длинного цилиндра. Для сетного полотна это неприемлемо. Указанные коэффициенты будем рассчитывать по формулам [7-9], полученным для сетного полотна с учетом поправок [13].

Граничные условия при $S = L$ (точка крепления сети к сферическому плаву) находим следующим образом

$$T(L)=T_0=\sqrt{Q^2+R_ш^2}\,,\quad \alpha(L)=\alpha_0=arctg\left(Q/R_ш\right). \qquad (10)$$

Сила гидродинамического сопротивления, действующая на сферу,

$$R_ш = \frac{1}{2} C_ш \frac{\pi D^2}{4} \rho V^2, \quad (11)$$

где D – диаметр сферы; при больших числах Рейнольдса коэффициент гидродинамического сопротивления сферы $C_ш$ = 0,44.

Математическая постановка краевой задачи включает кроме дифференциальных уравнений (6), уравнения для нахождения координат троса с граничными условиями:

$$\frac{dX}{dS} = \cos\alpha, \quad \frac{dY}{dS} = \sin\alpha, \; X(0) = 0, \; Y(0) = 0. \quad (12)$$

Результаты и обсуждение

Поставленная краевая задача не имеет аналитического решения. Поэтому она решалась численным методом в среде Mathcad. На рис. 2-9 представлены результаты численного решения краевой задачи при следующих значениях базовых параметров: L=H=2 м; Q = 6 Н; q = 0,1 Н/м; D = 14 см. Безразмерная дуговая координата обозначена s=S/L.

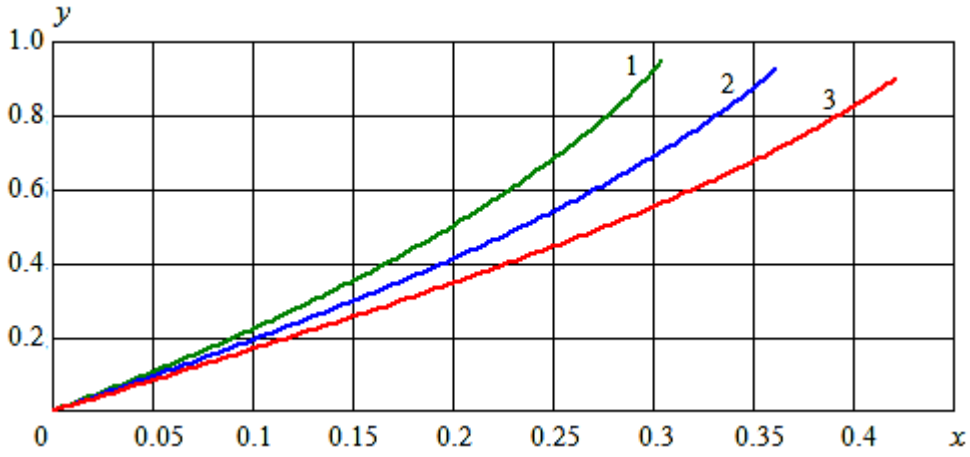


Рисунок 2 – Влияние профиля скорости водотока на форму полоски сети при d = 6 мм: 1 – $v(y)$ = const; 2 – C = 60 м^{0,5}/с; 3 – C = 8 м^{0,5}/с

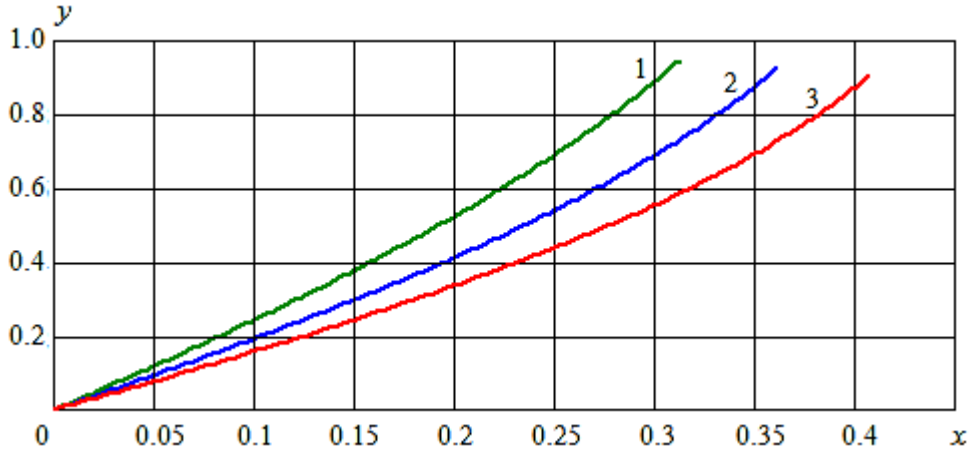


Рисунок 3 – Влияние диаметра нити на форму полоски сети при C = 60 м^{0,5}/с: 1 – d = 4 мм, 2 – d = 6 мм, 3 – d = 8 мм

На рис. 5-9 значения сил приведены на единицу ширины полоски сети.

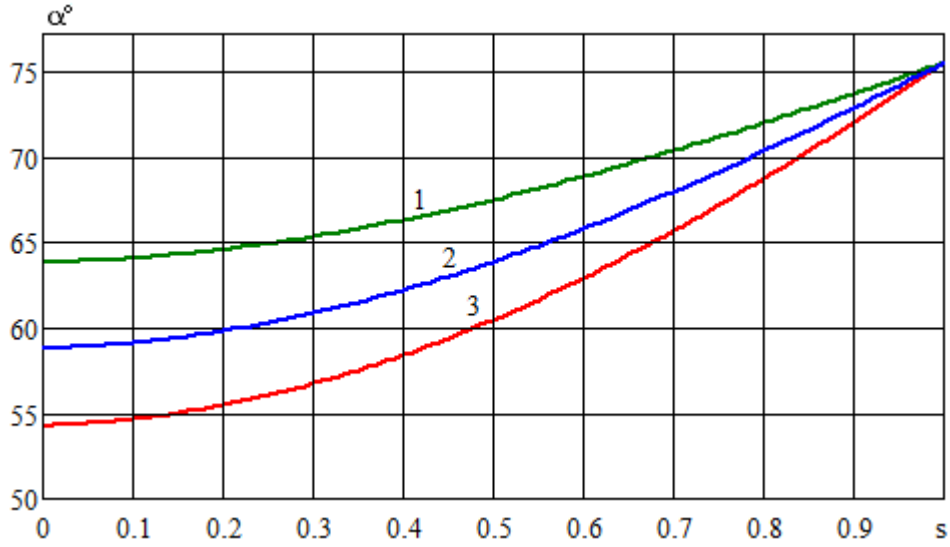


Рисунок 4 – Влияние диаметра нити на локальные углы атаки при $C = 8$ м^{0,5}/с. Обозначения, как на рис. 3

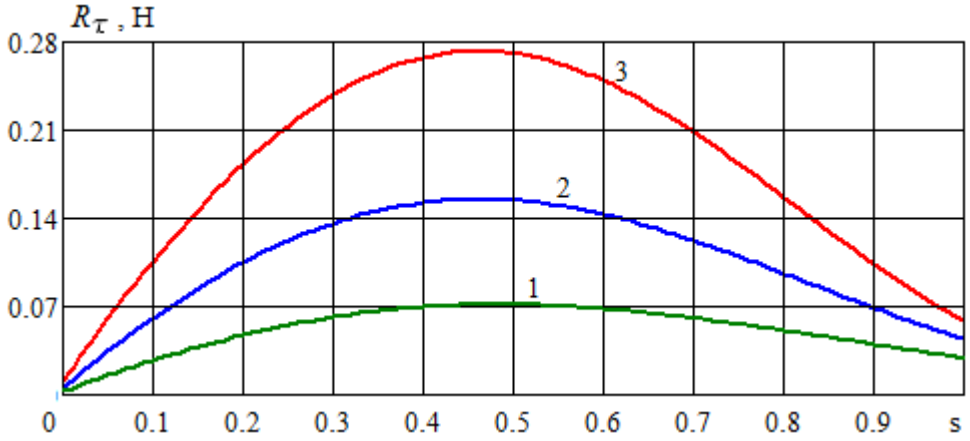


Рисунок 5 – Влияние диаметра нити на касательную составляющую гидродинамической силы при $C = 8$ м^{0,5}/с. Обозначения, как на рис. 3

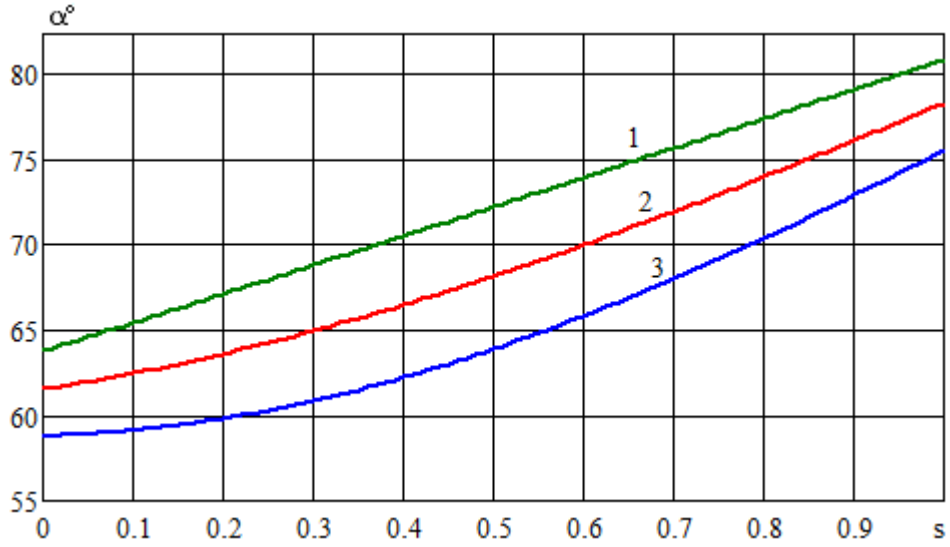


Рисунок 6 – Локальные углы атаки. Обозначения, как на рис. 2

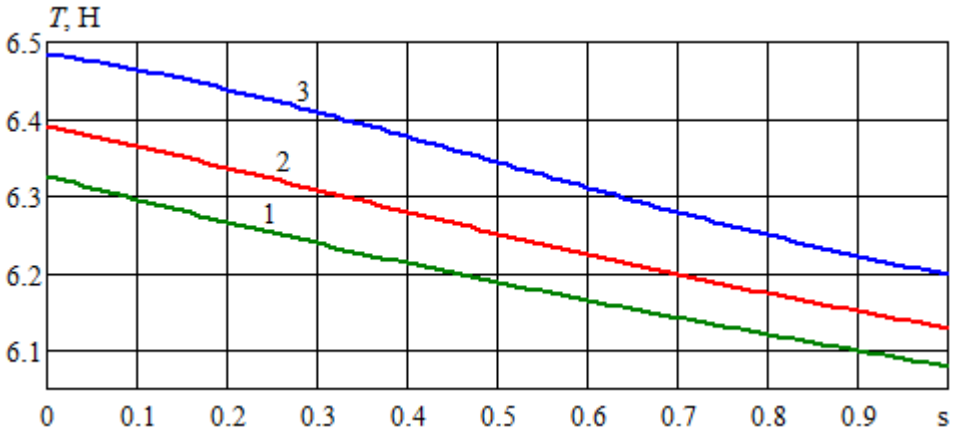


Рисунок 7 – Силы натяжения по длине. Обозначения, как на рис. 2

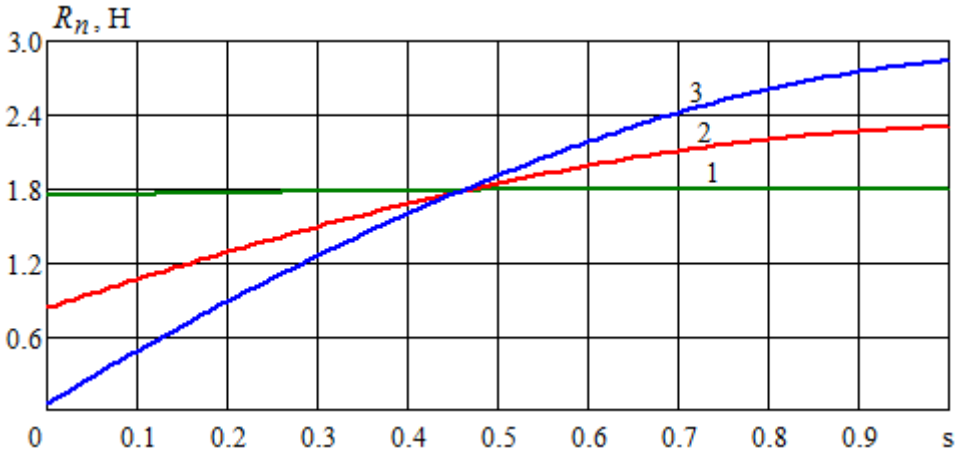


Рисунок 8 – Нормальные силы гидродинамического сопротивления. Обозначения, как на рис. 2

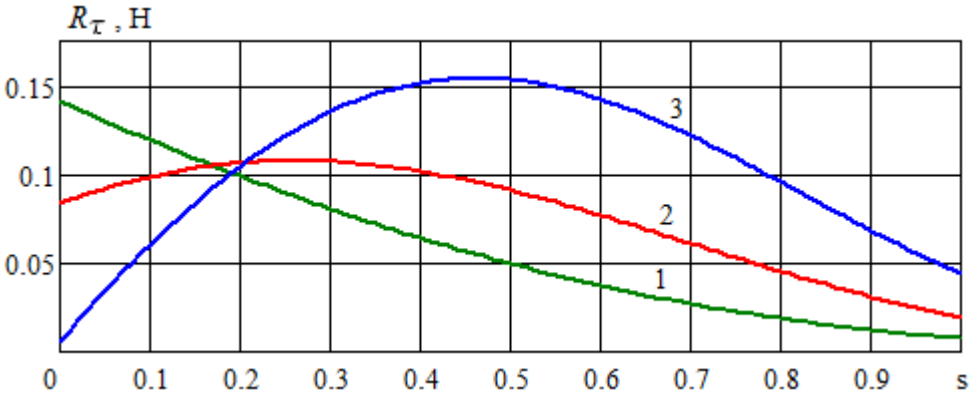


Рисунок 9 – Касательные силы гидродинамического сопротивления. Обозначения, как на рис. 2

По рис. 2 видно, что учет неравномерности профиля скорости водотока приводит к отклонению полоски сети по направлению течения. Это отклонение тем больше, чем меньше коэффициент Шези (больше шероховатость русла). В последнем случае, в соответствии с рис. 2, сферическое тело и верхняя часть полоски находятся в области повышенных скоростей воды, значит, на них действуют большие силы гидродинамического сопротивления. Поэтому и локальные углы атаки меньше при C = 8 м^{0,5}/с, чем при C = 60 м^{0,5}/с (см. рис. 4). Рис. 5 показывает, что силы натяжения монотонно увеличиваются от наименьшего значения в точке крепления к сфере до наибольшего значения у дна.

Неравномерность профиля скорости водотока приводит к увеличению сил натяжения. При этом нормальные силы гидродинамического сопротивления, действующие на верхнюю часть полоски, увеличиваются, а на нижнюю часть – уменьшаются (см. рис. 8).

По рис. 9 видно, что при равномерном профиле скорости воды касательные силы гидродинамического сопротивления монотонно уменьшаются с увеличением s. Если же учесть уменьшение скорости воды вблизи дна, то у функции $R_\tau(s)$ появляется максимум. Величина этого максимума тем больше, чем больше неравномерность профиля скорости воды.

Заключение

Таким образом, в статье обоснована необходимость учета уменьшения скорости воды вблизи дна при расчетах сил гидродинамического сопротивления, действующих на донный невод. При этом верхняя часть донного невода находится в области повышенных скоростей воды, значит, на них действуют большие силы гидродинамического сопротивления. Поэтому и локальные углы атаки уменьшаются при уменьшении коэффициента Шези (увеличении шероховатости русла водотока). Нормальные силы гидродинамического сопротивления, действующие на нижнюю часть донного невода, уменьшаются. У зависимости касательных сил гидродинамического сопротивления появляется максимум.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chen H., Christensen E.D. Investigations on the porous resistance coefficients for fishing net structures // Journal of Fluids and Structures. 2016. Vol. 65, No.1. P.76-107.
2. Experimental and numerical investigations of the hydrodynamic characteristics, twine deformation, and flow field around the netting structure composed of two types of twine materials for midwater trawls / B.N.N. Thierry, H. Tang, N.P. Achile. *et al.* // Journal of Ocean University of China. 2021. Vol. 20. P. 1215–1235.
3. Недоступ А.А., Ражев А.О., Насенков П.В. Моделирование характеристик донного сетного трала // Труды ВНИРО. 2023. Т. 194. С. 202-208.
4. Гидродинамика сетных жестких безузловых конструкций / А.А. Недоступ, А.О. Ражев А.О., П.В. Насенков и др. // Рыбное хозяйство. 2023. № 3. С. 96-102.
5. Гидродинамика узловых делей / А.А. Недоступ, А.О. Ражев, П.В. Насенков и др. // Рыбное хозяйство. 2024. № 5. С. 115-120.
6. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Кикот А.В., Бояринова Н.А. Методика определения гидродинамического сопротивления плоских элементов рыболовных сетей при поперечном обтекании // Рыбное хозяйство. 2010. № 4. С. 72-75.
7. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Кикот А.В., Бояринова Н.А. Гидродинамические силы сопротивления сетных частей орудий промышленного рыболовства при поперечном обтекании // Рыбное хозяйство. 2012. № 4. С. 109-111.
8. Наумов В.А., Бояринова Н.А. Эмпирические формулы для коэффициента сопротивления плоских рыболовных сетей при поперечном обтекании // Известия КГТУ. 2012. № 24. С. 143-150.
9. Наумов В.А., Агиевич Н.А. Эмпирическая формула для коэффициента гидродинамического сопротивления плоской рыболовной сети при продольном обтекании в автомодельной области // Известия КГТУ. 2014. № 32. С. 238-244.
10. Наумов В.А. Математическая постановка краевой задачи о равновесии полоски сети ставного невода // Известия КГТУ. 2013. № 28. С. 182-187.
11. Наумов В.А., Ахмедов И.М. Расчет формы и усилий в канатах с учетом их эластичности // Известия КГТУ. 2016. № 40. С. 159-166.

12. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., Ахмедов И.М. Анализ результатов испытания прочности трехпрядных канатов из полимерных материалов // Известия КГТУ. 2015. № 36. С. 43-51.

13. Проскурнин Е.Д. Проверка применимости формул для расчета коэффициента гидродинамического сопротивления сетных элементов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2019. Т. 5, № 1. С. 36-41.

14. Наумов В.А., Рожков А.А. Влияние профиля скорости водотока на равновесие тела, закрепленного тросом на дне // Комплексное использование водных объектов Калининградской области: сборник научных трудов. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2013. С. 93-98.

REFERENCES

1. Chen H., Christensen E.D. Investigations on the porous resistance coefficients for fishing net structures. Journal of Fluids and Structures. 2016. Vol. 65, No.1, pp.76-107.

2. Experimental and numerical investigations of the hydrodynamic characteristics, twine deformation, and flow field around the netting structure composed of two types of twine materials for midwater trawls / B.N.N. Thierry, H. Tang, N.P. Achile. *et al.* Journal of Ocean University of China. 2021. Vol. 20, pp. 1215–1235.

3. Nedostup A.A., Razhev A.O., Nasenkov P.V. *Modelirovanie harakteristik donnogo setnogo trala* [Modeling the characteristics of net trawl]. *Trudy VNIRO*. 2023. Vol. 194, pp. 202-208.

4. *Gidrodinamika setnyh zhestkih bezuzlovyh konstrukcij* [Hydrodynamics of net rigid nodeless structures]. A.A. Nedostup, A.O. Razhev A.O., P.V. Nasenkov *et al. Rybnoe hozyajstvo*. 2023. No. 3, pp. 96-102.

5. *Gidrodinamika uzlovyh delej* [Hydrodynamics of nodular seals]. A.A. Nedostup, A.O. Razhev, P.V. Nasenkov *et al. Rybnoe hozyajstvo*. 2024. No. 5, pp. 115-120.

6. Velikanov N.L., Naumov V.A., Kikot A.V., Boyarinova N.A. *Metodika opredeleniya gidrodinamicheskogo soprotivleniya ploskih elementov rybolovnyh setej pri poperechnom obtekanii* [Methodology for determining the hydrodynamic resistance of flat elements of fishing nets during transverse flow]. *Rybnoe hozyajstvo*. 2010. No. 4, pp. 72-75.

7. Velikanov N.L., Naumov V.A., Kikot A.V., Boyarinova N.A. *Gidrodinamicheskie sily soprotivleniya setnyh chastej orudij promyshlennogo rybolovstva pri poperechnom obtekanii* [Hydrodynamic forces of resistance of the netting parts of industrial fishing tools with transverse flow]. *Rybnoe hozyajstvo*. 2012. No. 4, pp. 109-111.

8. Naumov V.A., Boyarinova N.A. *Empiricheskie formuly dlya koeffitsienta soprotivleniya ploskikh rybolovnykh setey pri poperechnom obtekanii* [Empirical formula for the drag coefficient of a flat fishing netting at a cross flow]. *Izvestiya KGTU*. 2012. No.24, pp. 143-150.

9. Naumov V.A., Agievich N.A. *Empiricheskaya formula dlya koeffitsienta gidrodinamicheskogo soprotivleniya ploskoy rybolovnoy seti pri prodol'nom obtekanii v avtomodel'noy oblasti* [The empirical formula for hydrodynamic drag coefficient of flat fishing nets with longitudinal flow in self-similar region]. *Izvestiya KGTU*. 2014. No. 32, pp. 238-244.

10. Naumov V.A. *Matematicheskaya postanovka kraevoy zadachi o ravnovesii poloski stavnogo nevoda* [Mathematical formulation of the boundary value problem on the equilibrium of the strips of stationary netting]. *Izvestiya KGTU*. 2013. No. 28, pp. 182-187.

11. Naumov V.A., Ahmedov I.M. *Raschet formy i usilij v kanatah s uchetom ih elastichnosti* [Calculation of the shape and forces in ropes, taking into account their elasticity]. *Izvestia KGTU*. 2016. No. 40, pp. 159-166.

12. Naumov V.A., Ahmedova N.R., Ahmedov I.M. *Analiz rezul'tatov ispytaniya prochnosti trekhpryadnyh kanatov iz polimernyh materialov* [Analysis of the strength test results of three-row ropes made of polymer materials]. *Izvestiya KGTU*. 2015. No. 36, pp. 43-51.

13. Proskurnin E.D. *O koefficientah poluempiricheskoj modeli gidrodinamicheskogo soprotivleniya kanatno-setnyh elementov* [On the coefficients of a semi-empirical model of hydrodynamic drag of rope-mesh elements]. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii.* 2020. Vol. 6, No. 1, pp. 29-36.

14. Naumov V.A., Rozhkov A.A. *Vliyanie profilya skorosti vodotoka na ravnovesie tela, zakreplennogo trosom na dne* [Influence of the velocity profile of a watercourse on the equilibrium of a body fixed by a cable on the bottom]. *Kompleksnoe ispol'zovanie vodnyh ob"ektov Kaliningradskoj oblasti: sbornik nauchnyh trudov*. Kaliningrad: Izd-vo FGBOU VPO «KGTU». 2013, pp. 93-98.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Проскурнин Евгений Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, доцент, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: proskurnin@inbox.ru)	*Proskurnin Evgeny Dmitrievich* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: proskurnin@inbox.ru)

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; одобрена после рецензирования 13.07.2025, принята к публикации 31.07.2025.
The article was submitted 30.06.2025; approved after reviewing 13.07.2025; accepted for publication 31.07.2025.