Научная статья
УДК 639.2.081.117+532.5

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОСАДКИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛОСКОЙ СЕТИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ

Е.Д. Проскурнин[1,*]

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

Аннотация. В статье обоснована необходимость учета непосредственного влияния коэффициентов посадки *их* на коэффициент гидродинамического сопротивления плоской сети при поперечном обтекании (КГС ПС ПО). Установлено, что оба критических числа Рейнольдса заметно уменьшаются с ростом коэффициентов посадки от 0,1 до 0,707, а затем они незначительно возрастают. Аналогичным образом ведет себя зависимость КГС ПС ПО от коэффициентов посадки. С ростом чисел Рейнольдса КГС ПС ПО падает, что отмечалось во многих предыдущих публикациях. В статье установлено, в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса это падение весьма заметное при малых *их*, и оно совсем небольшое при *их*=0,707 и близких к нему значениях коэффициентов посадки.

Ключевые слова: *плоская сеть; поперечное обтекание; гидродинамическое сопротивление; коэффициенты посадки; числа Рейнольдса.*

Для цитирования: Проскурнин Е.Д. Влияние коэффициентов посадки на гидродинамическое сопротивление плоской сети при поперечном обтекании // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2024. Т.10. № 3. С. 50–58.

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 need to take into account the direct influence of the landing coefficients ux on the coefficient of hydrodynamic drag of a flat netting during transverse flow (CHD FN TF) is justified in the article. It was found that both critical Reynolds numbers decrease markedly with an increase in landing coefficients from 0.1 to 0.707, and then they increase slightly. The dependence of the CHD FN TF on the landing coefficients behaves in a similar way. The CHD FN TF is falling with the growth of Reynolds numbers, which was noted in many previous publications. The article found that this drop is very noticeable at low ux, in the studied range of Reynolds numbers, and it is very small at ux = 0.707 and close values of landing coefficients..

Keywords: *flat netting; transverse flow; hydrodynamic drag; landing coefficients; Reynolds numbers.*

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*. 2024. Vol.10, No.3, pp. 50–58.

© Проскурнин Е.Д. 2024

Введение

Коэффициенты посадки играют важную роль в определении гидродинамических сил, действующих на сетные орудия лова [1, 2]. В 1954 году А.С. Ревин предложил формулу для расчёта силы гидродинамического сопротивления плоской сети (ПС) при поперечном обтекании (ПО) R_x, которую можно записать в следующем виде [3]:

$$R_x = 93{,}8 \cdot \delta \cdot S \cdot V^{1{,}89}/(ux \cdot uy), \quad (1)$$

где V – скорость ПС ПО, м/с; S – площадь ПС в плане, м^2; $\delta = d/a$, d – диаметр нити ПС, м; a – шаг ячеи ПС, м; ux, uy – коэффициенты посадки ПС (КП ПС) в направлении X и Y, соответственно.

В трудах профессора А.Л. Фридмана с соавторами [4, 5] (1) была обобщена и преобразована к форме, используемой до настоящего времени:

$$R_x = 0{,}5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S_H \cdot V^2, \quad (2)$$

где ρ – плотность воды, кг/м^3; S_H – площадь нитей ПС в плане, м^2; C_x – коэффициент гидродинамического сопротивления (КГС) ПС ПО.

Хотя в формуле (2) отсутствуют КП ПС, они имеются в определении S_H:

$$S_H = \psi \cdot S, \quad \psi \equiv S_H/S = \delta\,/(ux\ uy), \quad (3)$$

где ψ – отношение площади нитей ПС в плане к площади ПС в плане, которую назвали сплошностью.

Исследования (см. [4-8] и библ. в них) показали, что КГС ПС ПО зависит от многих факторов, но главными являются сплошность и число Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = V \cdot d/\nu, \quad (4)$$

где ν – кинематическая вязкость воды, м^2/с.

В [9] было обращено внимание, что в классической гидромеханике, в качестве определяющей используют площадь в плане (например, площадь крыла). Тогда формулу (2) можно записать в такой форме:

$$R_x = 0{,}5 \cdot C_{x1} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2, \quad (5)$$

где C_{x1} связан с прежним КГС ПС ПО: $C_{x1} = \psi \cdot C_x$. Именно эта форма КГС ПС ПО будет использована далее в данной статье, так в (5) только КГС зависит от КП ПС. Тогда как в (2) еще и площадь нитей зависит от значений коэффициентов посадки.

С достаточной для инженерных расчетов степенью точности можно полагать

$$C_{x1} = f\,(\psi, \mathrm{Re}). \quad (6)$$

Казалось бы, в соответствии с формой функции (6), нет необходимости непосредственно исследовать влияние значений КП ПС, так как они учитываются в сплошности. Однако КП ПС зависят от сил натяжения, а в ряде исследований (например, [10,11]) было показано, что величина сил натяжения может заметно меняться в канатно-сетных элементах орудий лова. Но это явление не учитывалось в предыдущих работах по КГС ПС ПО [12-16].

Цель данной статьи – исследование влияния КП ПС на КГС при различных значениях определяющих параметров, характерных для условий использования сетных орудий лова.

Материалы и методы

Используя известное тождество $ux^2 + uy^2 = 1$, можем преобразовать формулу (3) для сплошности ПС, как функции одной переменной ux с одним параметром δ:

$$\psi(ux,\delta) = \delta/[ux\cdot(1 - ux^2)^{0,5}]. \quad (7)$$

Найдем производную от функции (7):

$$\psi'(ux) = \delta\cdot ux/(1 - 2\,ux^2)/(ux^2 - ux^4)^{1,5}. \quad (8)$$

Формально, область определения (7): $0 \le ux \le 1$. Но для реально используемых величин коэффициенты посадки ПС не могут принимать граничные значения. Тогда $\psi'(ux) = 0$ лишь в одной точке $ux_0 \approx 0{,}707$. В этой точке функция $\psi(ux)$ имеет минимум, что видно на рис. 1. С ростом параметра δ сплошность увеличивается.

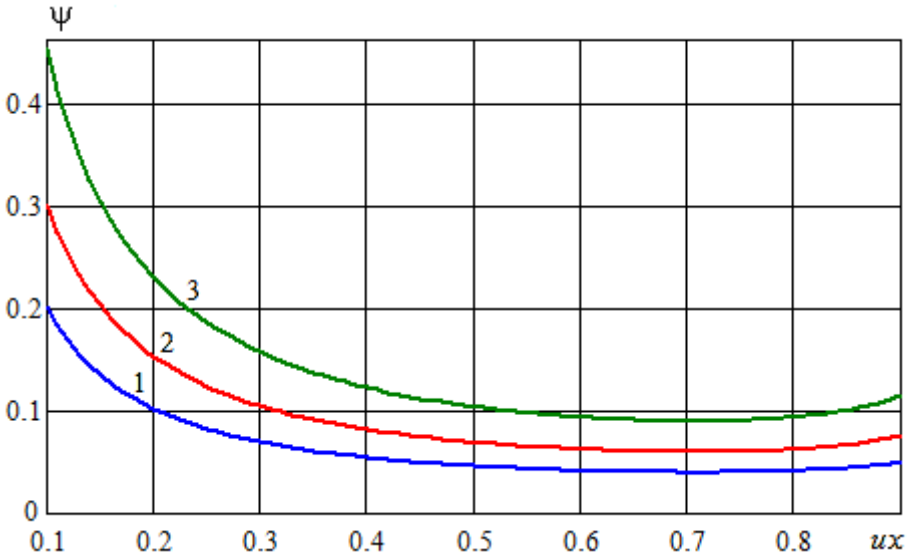


Рисунок 1 – Зависимость сплошности сетного полотна от коэффициента посадки при различных значениях отношения δ: 1 – δ = 0,02; 2 – δ = 0,03; 3 – δ = 0,045

В Калининградском государственном техническом университете (КГТУ) была разработана полуэмпирическая теория расчета сил, действующих в различных сетных элементах орудий [12-16], в том числе предложен метод расчета КГС ПС ПО, справедливый во всем диапазоне чисел Рейнольдса. В [17] были скорректированы коэффициенты полуэмпирической модели, чтобы полученные функции не имели разрывов. Но все формулы были записаны для КГС ПС ПО C_x. В данном исследовании их необходимо преобразовать для C_{x1} в зависимости от диапазона изменения чисел Рейнольдса (k – номер диапазона):

$$C_{x1} = f_k\,(\mathrm{Re}, ux, \delta),\ k = 1, 2, 3, 4; \quad (9)$$

$$f_1(\mathrm{Re}, ux, \delta)) = 60\ \psi^2(ux,\delta)\ /[\mathrm{Re}\cdot(1 - \psi(ux,\delta))] \ \text{ при } \mathrm{Re} \le \mathrm{Re}_1; \quad (10)$$

$$f_2\,(\mathrm{Re}, ux, \delta)) = 19{,}4\cdot\ \psi(ux,\delta)\cdot[2\ \psi(ux,\delta)\ /\mathrm{Re}]^{0,36} \ \text{ при } \ \mathrm{Re}_1 < \mathrm{Re} < 373\ \psi(ux,\delta); \quad (11)$$

$$f_3\,(\mathrm{Re}, ux, \delta) = 9{,}33\cdot\ \psi(ux,\delta)\cdot[2\ \psi(ux,\delta)\ /\mathrm{Re}]^{0,22} \ \text{ при } \ 373\ \psi(ux,\delta) < \mathrm{Re} < \mathrm{Re}_2; \quad (12)$$

$$f_4\,(\mathrm{Re}, ux, \delta) = \psi(ux,\delta)\cdot[1{,}41 + 1{,}70\ \psi(ux,\delta)] \quad \text{при } \mathrm{Re} \geq \mathrm{Re}_2. \tag{13}$$

Критическое число Re_1 соответствующее переходу от линейной области гидродинамического сопротивления ПС к промежуточной области сопротивления, рассчитывается, как в [17], по формуле:

$$\mathrm{Re}_1 = 3{,}95\cdot \psi(ux,\delta)/[1 - \psi(ux,\delta)]^{1{,}56}. \tag{14}$$

Критическое число Re_2, соответствующее переходу от промежуточной области гидродинамического сопротивления ПС к квадратичной области сопротивления:

$$\mathrm{Re}_2 = 2\cdot \psi(ux,\delta)\cdot[9{,}33/(1{,}41 + 1{,}70\ \psi(ux,\delta))]^{4{,}545}. \tag{15}$$

Заметим, что эмпирические коэффициенты в формулах (10)-(15) были подобраны путем сравнения с экспериментальными данными [5, 7, 12, 13] для значений сплошности ПС ПО из диапазона от 0,05 до 0,5.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2, 3 представлены результаты расчета критических чисел Рейнольдса по формулам (14) и (15). Оба критических числа возрастают с увеличением δ и имеют минимум при ux_0.

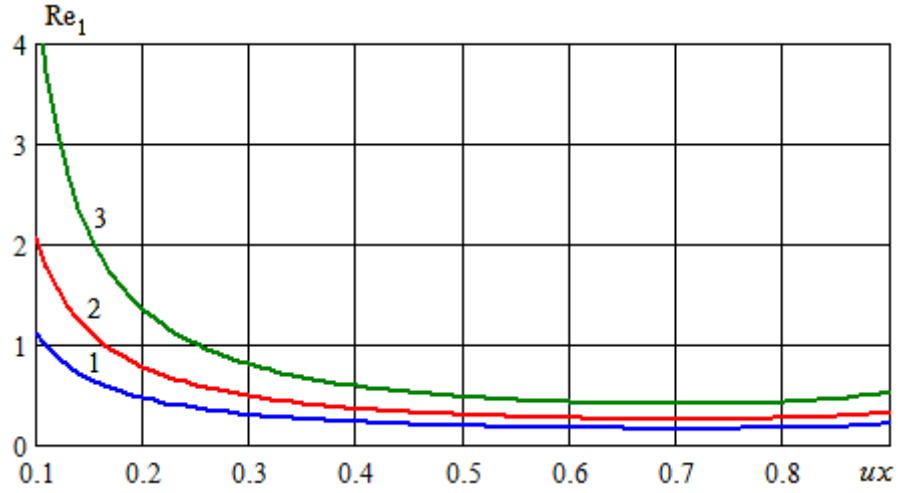


Рисунок 2 – Зависимость первого критического числа Рейнольдса от коэффициента посадки при различных значениях отношения δ. Обозначения, как на рис. 1

ISSN 2413–9858

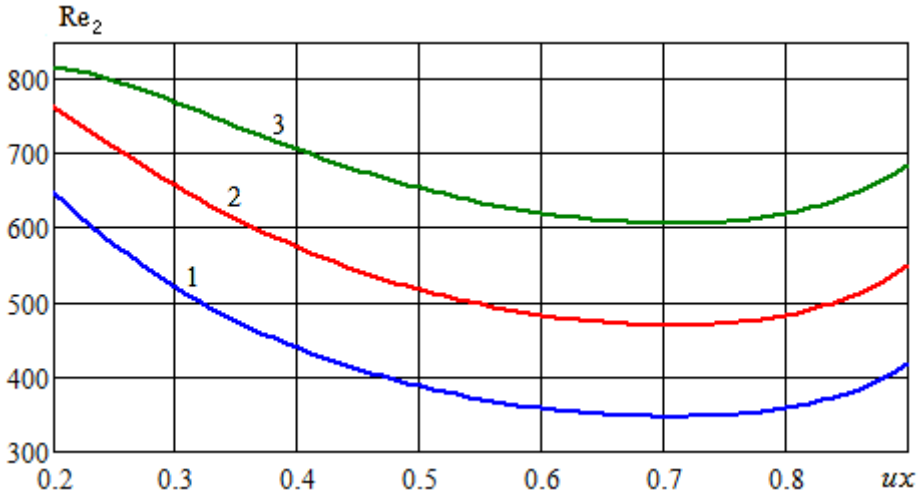


Рисунок 3 – Зависимость второго критического числа Рейнольдса от коэффициента посадки при различных значениях отношения δ. Обозначения, как на рис. 1

Заметим, что в промысловых условиях, практически, не бывает таких малых чисел Рейнольдса, как получились на рис. 2. То есть линейная область гидродинамического сопротивления не реализуется. Тогда как значения Re, как на рис. 3, встречаются довольно часто. Другими словами, обтекание ПС ПО происходит либо в квадратичной, либо в переходной области сопротивления.

На рис. 4-7 представлены результаты расчета КГС ПС ПО в зависимости от *ux* при различных значениях чисел Рейнольдса и отношения δ.

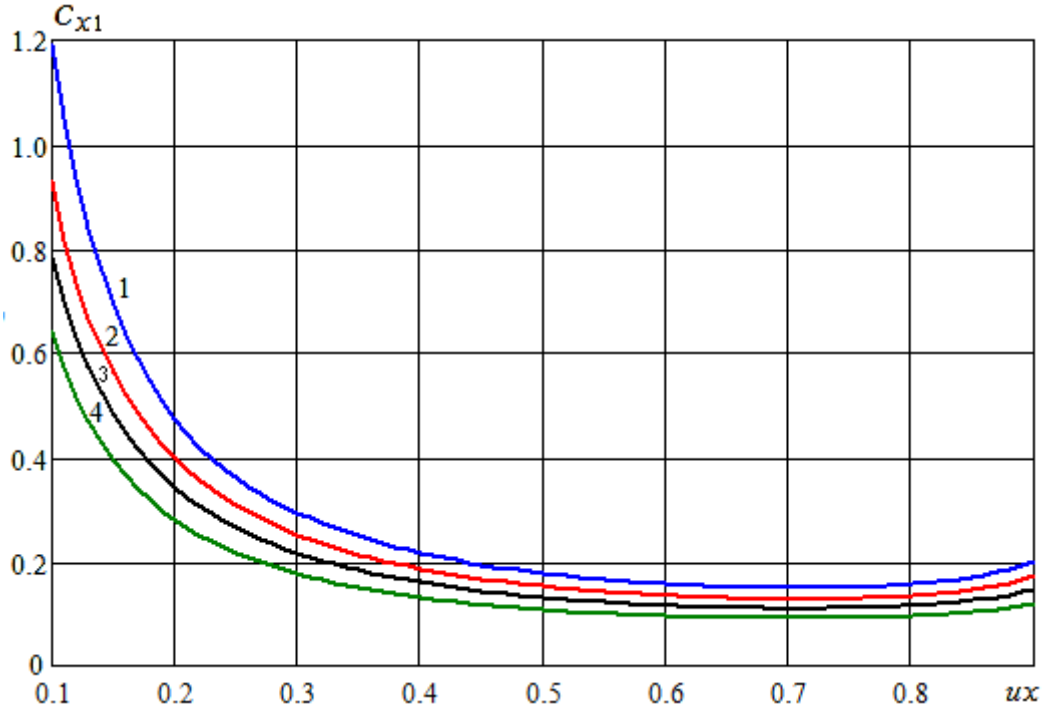


Рисунок 4 – Зависимость КГС ПС ПО от коэффициента посадки при δ = 0,03 различных значениях чисел Рейнольдса: 1 – Re=50, 2 – Re=100, 3 – Re=200, 4 – Re=500

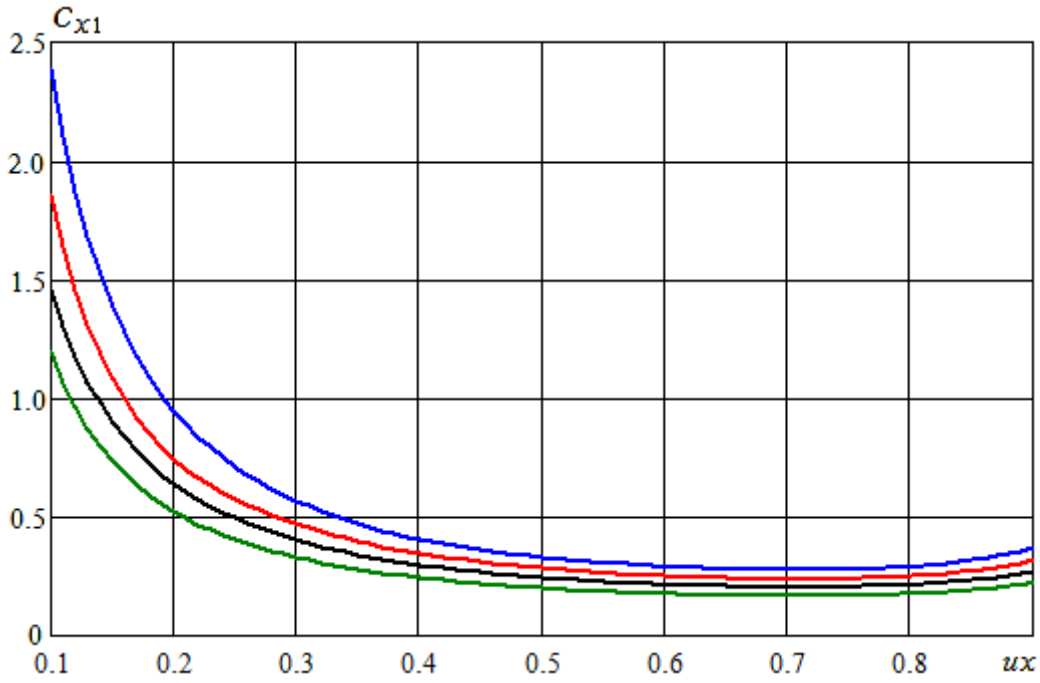


Рисунок 5 – Зависимость КГС СППО от коэффициента посадки при δ = 0,05 различных значениях чисел Рейнольдса. Обозначения, как на рис.4

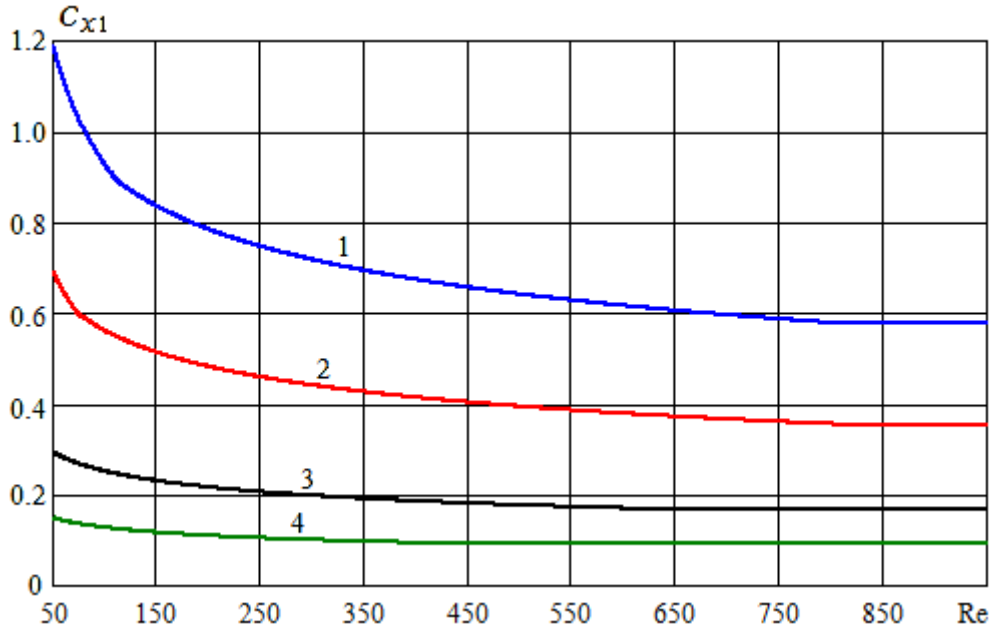


Рисунок 6 – Зависимость КГС ПС ПО от чисел Рейнольдса при δ = 0,05 и различных значениях коэффициента посадки: 1 – *ux*=0,1; 2 –*ux*=0,15; 3 – *ux*=0,3; 4 – *ux*=ux_0

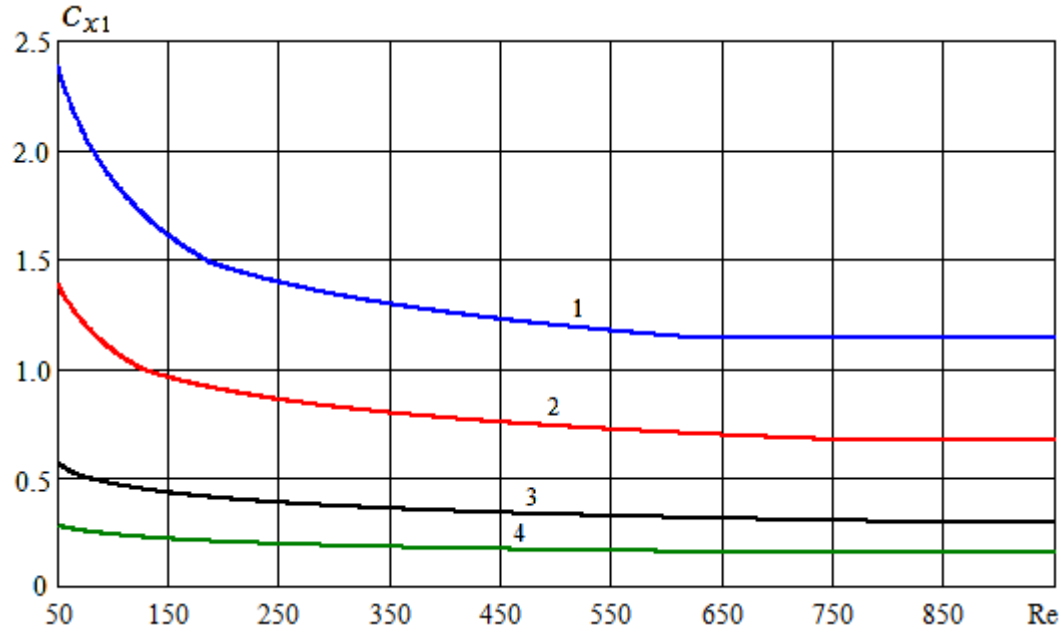


Рисунок 7 – Зависимость КГС ПС ПО от чисел Рейнольдса при δ = 0,03 и различных значениях коэффициента посадки. Обозначения, как на рис. 6

КГС ПС ПО заметно снижается при увеличении коэффициента посадки от 0,1 до ux_0, а затем незначительно увеличивается. Увеличение отношения δ во всех случаях приводит к росту C_{x1}. Как было показано во многих предыдущих исследованиях, с ростом чисел Рейнольдса КГС ПС ПО падает. Но, если при малых *ux* это падение C_{x1} весьма заметное (линии 1 на рис. 6 и 7), то при $ux=ux_0$ и близких значениях КП оно незначительное в исследованном диапазоне Re (линии 4 на рис. 6 и 7).

Заключение

Таким образом, в статье обоснована необходимость учета непосредственного влияния КП *ux* на КГС ПС ПО. Установлено, что оба критических числа Рейнольдса заметно уменьшаются с ростом *ux* от 0,1 до 0,707, а затем незначительно возрастают. Аналогичным образом изменяется КГС ПС ПО. С ростом чисел Рейнольдса КГС ПС ПО падает, что отмечалось во многих предыдущих публикациях. Установлено, это падение весьма заметное при малых *ux* и оно совсем небольшое при *ux*=0,707 и близких значениях КП в исследованном диапазоне чисел Re.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баранов Ф.И. Техника промышленного рыболовства: монография. Москва: Пищепромиздат, 1960. 695 с.
2. Габрюк В.И., Кулагин В.Д. Механика орудий рыболовства и АРМ промысловика: монография. Москва: Колос, 2000. 415 с.
3. Ревин А.С. Исследование влияния структуры и формы траловой сети на ее сопротивление в воде // Сборник научных трудов ВНИРО. 1959. Т. 41. С. 66-82.
4. Фридман А.Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства: учебник. Москва: Пищевая промышленность, 1969. 568 с.
5. Imai T., Nakamura T. Fluid dynamical drag coefficient on the weaver's-knot netting relative to Reynolds number // Nippon Suisan Gakkaishi. 1989. No. 55. P. 1753-1757.
6. Розенштейн М.М. Механика орудий рыболовства: учебное пособие. Калининград: Изд-во КГТУ, 2000. 364 с.

7. 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. Vol. 6. Proceeding of the 9-th International Workshop on Methods for the development and evaluation of maritime technologies. Japan, Nara, 2009. P. 77-94.

8. Недоступ А.А. Методы расчета пассивных сетных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства: монография. Калининград: Изд-во КГТУ, 2010. 280 с.

9. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Гидродинамическое сопротивление систем из стержней и нитей: монография. Калининград: Изд-во КГТУ, 2015. 192 с.

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

12. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Бояринова Н.А., Кикот А.В. Гидродинамические силы сопротивления сетных частей орудий лова промышленного рыболовства при поперечном обтекании // Рыбное хозяйство. 2012. № 4. С. 109-111.

13. Наумов В.А., Бояринова Н.А. Эмпирические формулы для коэффициента сопротивления плоских рыболовных сетей при поперечном обтекании // Известия КГТУ. 2012. № 24. С. 143-150.

14. 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.

15. Наумов В.А., Агиевич Н.А. Коэффициент гидродинамического сопротивления плоской сети при продольном обтекании в переходной области // Известия КГТУ. 2014. № 34. С. 89-94.

16. Бояринова Н.А., Кикот А.В., Наумов В.А. Особенности статистической обработки результатов экспериментальных исследований случайной функции, полученных разными авторами // Известия КГТУ. 2015. № 37. С. 199-206.

17. Проскурнин Е.Д. О коэффициентах полуэмпирической модели гидродинамического сопротивления канатно-сетных элементов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2020. Т.6, № 1. С. 29-36.

REFERENCES

1. Baranov F.I. *Tekhnika promyshlennogo rybolovstva: monografiya* [Industrial fishing technique: monograph]. Moscow: Pishchepromizdat, 1960. 695 p.

2. Gabryuk V.I., Kulagin V.D. *Mekhanika orudij rybolovstva i ARM promyslovika: monografiya* [Mechanics of fishing tools and AWP of a tradesman: monograph]. Moscow: Kolos, 2000. 415 p.

3. Revin A.S. *Issledovanie vliyaniya struktury i formy tralovoj seti na ee soprotivlenie v vode* [Investigation of the influence of the structure and shape of the trawl netting on its drag in water]. *Sbornik nauchnyh trudov VNIRO*. 1959. Vol. 41, pp. 66-82.

4. Fridman A.L. *Teoriya i proektirovanie orudij promyshlennogo rybolovstva: uchebnik* [Theory and design of industrial fishing implements: textbook]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 1969. 568 p.

5. Imai T., Nakamura T. Fluid dynamical drag coefficient on the weaver's-knot netting relative to Reynolds number. Nippon Suisan Gakkaishi. 1989. No. 55, pp. 1753-1757.

6. Rozenshtejn M.M. *Mekhanika orudij rybolovstva: uchebnoe posobie* [Mechanics of fishing tools: study guide]. Kaliningrad: Izd-vo KGTU, 2000. 364 p.

7. 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. Vol. 6. Proceeding of the 9-th International Workshop on Methods for the development and evaluation of maritime technologies. Japan, Nara. 2009, pp. 77-94.

8. Nedostup A.A. *Metody rascheta passivnyh setnyh orudij vnutrennego i pribrezhnogo rybolovstva: monografiya* [Calculation methods of passive net tools of inland and coastal fishing: monograph]. Kaliningrad: KGTU Publ., 2010. 280 p.

9. Velikanov N.L., Naumov V.A. *Gidrodinamicheskoe soprotivlenie sistem ih sterzhnej i nitej*: *monografiya* [Hydrodynamic drag in systems of rods and filaments: monograph]. Kaliningrad: KGTU Publ. 2015. 192 p.

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., 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.

12. 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 network parts of industrial fishing tools with transverse flow]. *Rybnoe hozyajstvo*. 2012. No. 4, pp. 109-111.

13. 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 nets at a cross flow]. *Izvestiya KGTU*. 2012. No. 24, pp. 143-150.

14. 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.

15. Naumov V.A., Agievich N.A. *Koefficient gidrodinamicheskogo soprotivleniya ploskoj seti pri prodol'nom obtekanii v perekhodnoj oblasti* [Coefficient of hydrodynamic drag of a flat netting for longitudinal flow in the transition region]. *Izvestiya KGTU*. 2014. No. 34, pp. 89-94.

16. Boyarinova N.A., Kikot A.V., Naumov V.A. *Osobennosti statisticheskoj obrabotki rezul'tatov eksperimental'nyh issledovanij sluchajnoj funkcii, poluchennyh raznymi avtorami* [Features of statistical processing of the results of experimental studies of a random function obtained by different authors]. *Izvestiya KGTU*. 2015. No. 37, pp. 199-206.

17. Proskurnin E.D. *O koefficientah poluempiricheskoj modeli gidrodinamicheskogo soprotivleniya kanatno-setnyh elementov* [About 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.

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 09.07.2024; одобрена после рецензирования 15.07.2024, принята к публикации 30.07.2024.
The article was submitted 09.07.2024; approved after reviewing 15.07.2024; accepted for publication 30.07.2024.