

РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО, АКВАКУЛЬТУРА И ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО

Научная статья

УДК 532.5+639.2.081:681.3

DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2025-74-16

EDN: TYJIVN

Характеристики деформации и поле течения вокруг безузловой полиэтиленовой сети

Дмитрий Анатольевич Пилипчук

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
Владивосток, Россия
pilipchukda@mail.ru

Аннотация. Исследование характеристик деформации и особенностей течения жидкости вокруг безузловой полиэтиленовой сети при взаимодействии жидкой среды (Fluid-Structure Interaction, FSI) представляет собой комплексную задачу, требующую глубокого анализа и применения современных методов вычислительной гидродинамики и механики деформируемых твердых тел.

В данной работе проводится детальное изучение поведения сети под воздействием потока жидкости, что позволяет выявить ключевые механизмы деформации и оценить их влияние на характеристики потока. Особое внимание уделяется учету связи между сетным полотном и жидкой средой, что является важным аспектом для корректного моделирования процессов взаимодействия.

Ключевые слова: твердые тела, метод конечных элементов, вычислительная гидродинамика, сеть, деформация

Для цитирования: Пилипчук Д. А. Характеристики деформации и поле течения вокруг безузловой полиэтиленовой сети // Научные труды Дальрыбвтуза. 2025. Т. 74, № 4. С. 156–163.

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2025. Vol. 74, no. 4. P. 156–163.

FISHERIES, AQUACULTURE AND INDUSTRIAL FISHERIES

Original article

Deformation characteristics and flow field around a nodeless polyethylene mesh

Dmitry A. Pilipchuk

Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia
pilipchukda@mail.ru

Abstract. The study of the deformation characteristics and features of the fluid flow around a nodeless polyethylene network during the interaction of a liquid medium (Fluid-Structure Interaction, FSI) is a complex task requiring in-depth analysis and application of modern methods of computational fluid dynamics and mechanics of deformable solids.

In this paper, a detailed study of the behavior of the network under the influence of fluid flow is carried out, which allows us to identify key deformation mechanisms and assess their impact on the flow characteristics. Special attention is paid to taking into account the connection between the mesh web and the liquid medium, which is an important aspect for the correct modeling of interaction processes.

Keywords: solids, finite element method, computational fluid dynamics, network, deformation

For citation: Pilipchuk D. A. Deformation characteristics and flow field around a nodeless polyethylene mesh. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2025; 74(4): 156–163. (In Russ.).

Введение

Сетные полотна являются наиболее важным компонентом орудий рыболовства. Они представляют собой сложную, гибкую и пористую структуру [1]. Безузловая полиэтиленовая (ПЭ) сеть используется по всему миру благодаря своим превосходным гидродинамическим характеристикам, таким как низкое сопротивление и влагопоглощение [1]. Под совместным действием различных внешних и внутренних сил сеть легко деформируется [1].

Под действием потока воды сеть меняет геометрию, а гидродинамические силы, действующие на неё, стремятся уменьшиться. Деформированная сеть влияет на распределение поля течения вокруг неё.

За последнее десятилетие численное моделирование стало одним из самых популярных методов оценки конструкции рыболовных снастей и их эффективности [2].

Одним из преимуществ численного моделирования является то, что оно учитывает конструкцию орудия лова и окружающую среду, в которой оно находится. Это позволяет решать уравнения гидродинамики с учётом гидродинамических сил и распределения скоростей в каждой части системы. Некоторые исследователи показали, что результаты, полученные с помощью численного моделирования, и результаты экспериментов в лотковых бассейнах схожи, а затраты на численное моделирование всегда ниже, чем затраты на эксперименты в лотковых бассейнах. Численное моделирование с использованием взаимодействия жидкости и орудия лова предполагает объединение вычислительной гидродинамики (CFD) и структурной механики [2].

Существуют различные модели для моделирования взаимодействия жидкости и конструкции, которые делятся на односторонние и двусторонние [3].

Исследования гидродинамического поведения сетей и поля течения через рыболовную сеть проводились в течение нескольких десятилетий с использованием теоретического анализа, экспериментов в лотковых бассейнах и численного моделирования [2, 4].

Исследователи [5–7] провели эксперименты по нахождению гидродинамических характеристик сеток с узлами и без узлов, изготовленных из плетеных, крученых канатов. Основное внимание уделялось гидродинамическим характеристикам рыболовных снастей и анализу поля течения с помощью трёхмерного численного моделирования. Однако редко изучаются такие характеристики, как деформация сети под воздействием потока воды и распределение окружающего поля течения. Целью данного исследования было численное изучение влияния угла атаки на гидродинамические силы, поле течения и структурную деформацию полиэтиленовой сети. Для описания поля течения через сеть и изучения турбулентного потока использовалась модель $k-\omega$ SST. Для описания гибкости структуры сетки и смещения узлов использовалась нелинейная конечно-элементная модель с большими деформациями.

Объекты и методы исследований

Вода является несжимаемой ньютоновской жидкостью, течение рассматривалось как вязкое трёхмерное нестационарное турбулентное течение в пограничном слое. Модель $k-\omega$ SST – это модель турбулентности с широким спектром применения. Эта модель, как правило, более точно предсказывает особенности пристеночного пограничного слоя благодаря расширенной обработке пристеночных областей по умолчанию [8].

SST-модель Ментера представляет собой гибрид k - ϵ и k - ω моделей турбулентности и может автоматически переключаться между основным потоком и пристеночной областью [9–10].

Для анализа структурных деформаций сети в потоке жидкости использовалась нелинейная структурная модель конечных элементов с большой деформацией. В этом исследовании для моделирования крепления сети использовался круглый цилиндр с шестью степенями свободы. Сама сеть выполнена в виде круглых цилиндров, соединённых с помощью шарниров (шарнир не имеет изгибающего момента). Геометрическая структура сети в потоке жидкости рассматривалась как нелинейная структура с большой деформацией.

В этой численной модели имеется два набора элементов и узлов: один для потока жидкости, а другой – для структуры сети. Давление (Pa) на узлы текучей среды может быть получено путем решения модели k - ω SST, а нагрузки, действующие на элемент сети, могут быть рассчитаны путем интегрирования давления на границе раздела текучая среда–структура по внешнему периметру сетки. Линейная нагрузка действует на каждый элемент сети как входная гидродинамическая нагрузка и используется для расчета деформации конструкции сети с использованием нелинейной структурной модели.

Структура сетки, используемая в численной модели, показана на рис. 1.

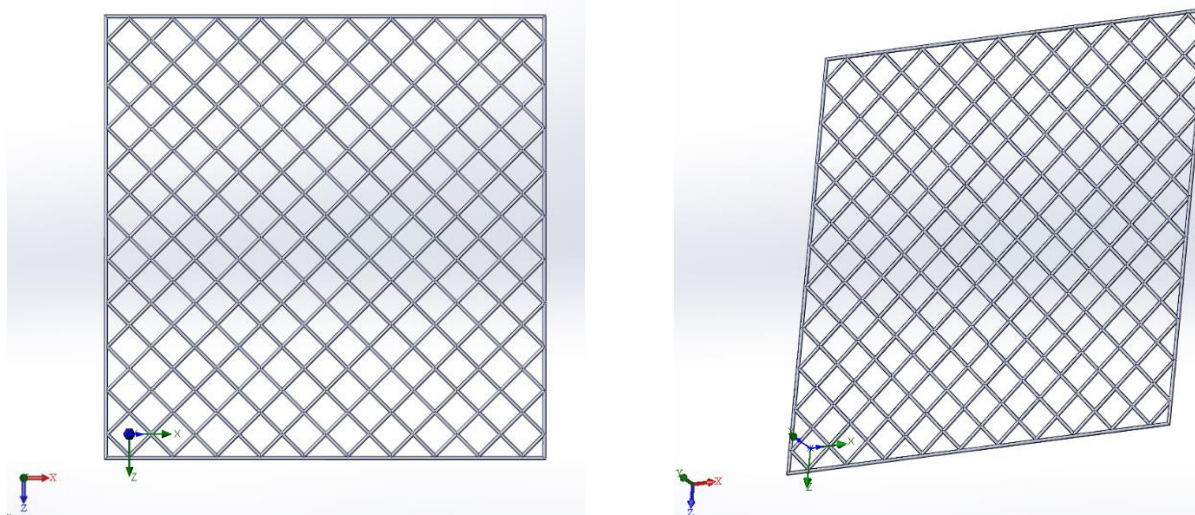


Рис. 1. Трехмерный вид сети. Составлено автором
Fig. 1. 3D view of numerical netting. Compiled by the author

Структура сети представлена многочисленными цилиндрами, которые являются препятствиями для потока жидкости. В данном исследовании каркас представлен четырьмя цилиндрами (рис. 1). На рис. 2 представлены граничные условия направления течения жидкости.

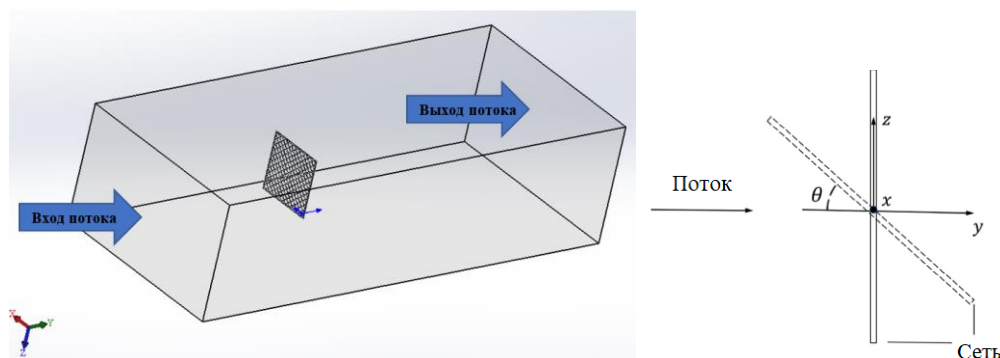


Рис. 2. Распределение сети в модели CFD, используемой для численного моделирования течения. Составлено автором

Fig. 2. Mesh distribution of the CFD model used in the numerical simulation of a netting. Compiled by the author

Левая сторона расчетной области была задана в качестве границы скорости на входе, представляющей входную поверхность. На этой поверхности скорость потока устанавливается равной скорости набегающего потока, а давление – равным нулю. Началом координат был выбран центр плоской сетки на свободной поверхности. В системе координат «Y» обозначает направление потока, «Z» указывает направление вверх, а «X» перпендикулярен направлению потока в горизонтальной плоскости. При использовании модели k- ω для расчета турбулентного потока следует указать величины турбулентности на входе (k и ω) на границе скорости и входа.

По сравнению с другими моделями турбулентности, модель k- ω SST может быть интегрирована через вязкий подслой без необходимости двухслойного подхода. Эта особенность может быть использована для обработки стенок, нечувствительных к подъемной силе. Для достижения оптимального типа и размера сети дробления были применены структурированные сетки для создания сетки области продувки и исследуемого объекта. Сверху, по бокам и снизу сеть была зафиксирована (рис. 3).

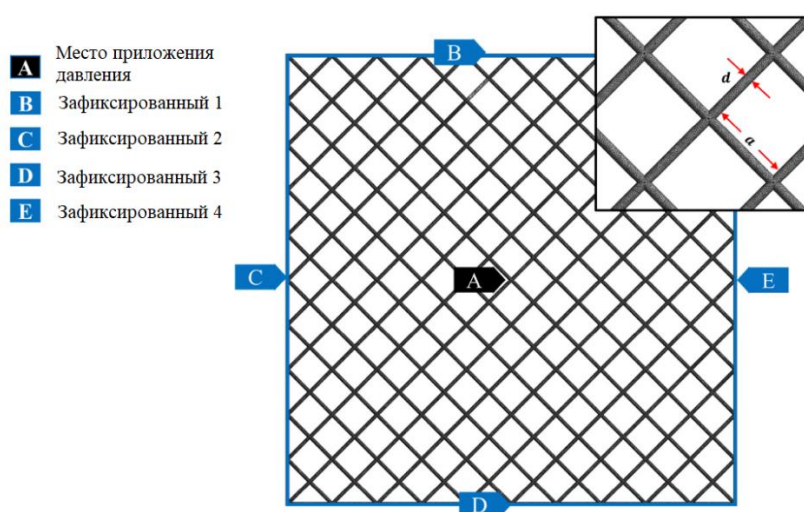


Рис. 3. Распределение сети в модели и ограничения. Составлено автором
Fig. 3. Mesh distribution in the model and constraints. Compiled by the author

Результаты и их обсуждения

Экспериментальные результаты, полученные в работе [2], были использованы для проверки численной модели. В численном моделировании были использованы три полиэтиленовые сети без узлов с различными диаметрами и шагом ячеей, как показано в табл. 1.

Таблица 1

Параметры структуры сети и свойства материалов, использованных в моделировании

Table 1

Structure parameters of the netting and material properties used in the simulations

№ нитки	Материал	D, мм	a, mm
Сеть 1	Полиэтилен	2	60
Сеть 2	Полиэтилен	3	30
Сеть 3	Полиэтилен	4	30

Наклонные силы сопротивления и подъемная сила были рассчитаны при скоростях набегающего потока 0,5, 0,8 и 1 м/с, а нормальная и параллельная силы сопротивления были измерены при скоростях набегающего потока 0,5, 0,6 и 1,2 м/с. Угол атаки изменялся от 0° до 90°

с интервалом в 15° . Угол раскрытия ячеей модели 45° . Число Рейнольдса описано в табл. 2. Из этой таблицы видно, что число Рейнольдса для сети варьируется от 949,40 до 3687,50, что свидетельствует о развитии турбулентного течения через сеть, что оправдывает использование модели $k-\omega$.

Как показано на рис. 4, перед сеткой имеется небольшая зона затухания скорости, а за сеткой – очень большая зона затухания скорости, соответствующая следам за сеткой и турбулентному обтеканию сетки. Эти результаты показывают, что увеличение угла атаки увеличивает зону ослабления скорости (зону кильватерного следа). Снижение скорости в зоне кильватерного следа максимально, когда угол атаки равен 90° .

Таблица 2

Число Рейнольдса для каждой сетки

Table 2

Reynolds number for each netting

Скорость, м/с	Re		
	Сеть 1	Сеть 2	Сеть 3
0,4	949,40	1113,10	1229,17
0,5	1186,76	1391,37	1536,46
0,6	1424,11	1669,64	1843,75
0,8	1898,81	2226,19	2458,33
1,0	2373,51	2782,74	3072,92
1,2	2848,21	3339,29	3687,50

Вдоль центральной линии сетки происходит очевидное снижение скорости, и это снижение скорости уменьшается с уменьшением угла наклона (рис. 4). Колебания величины изменения скорости наблюдаются вдоль центральной линии сети при $0,2 < \alpha < 0,5$ для всех углов атаки.

Эти колебания в основном обусловлены эффектом следа от отверстия в сети, что указывает на развитие турбулентного течения из-за завихрений вокруг сети, что приводит к снижению скорости (рис. 5).

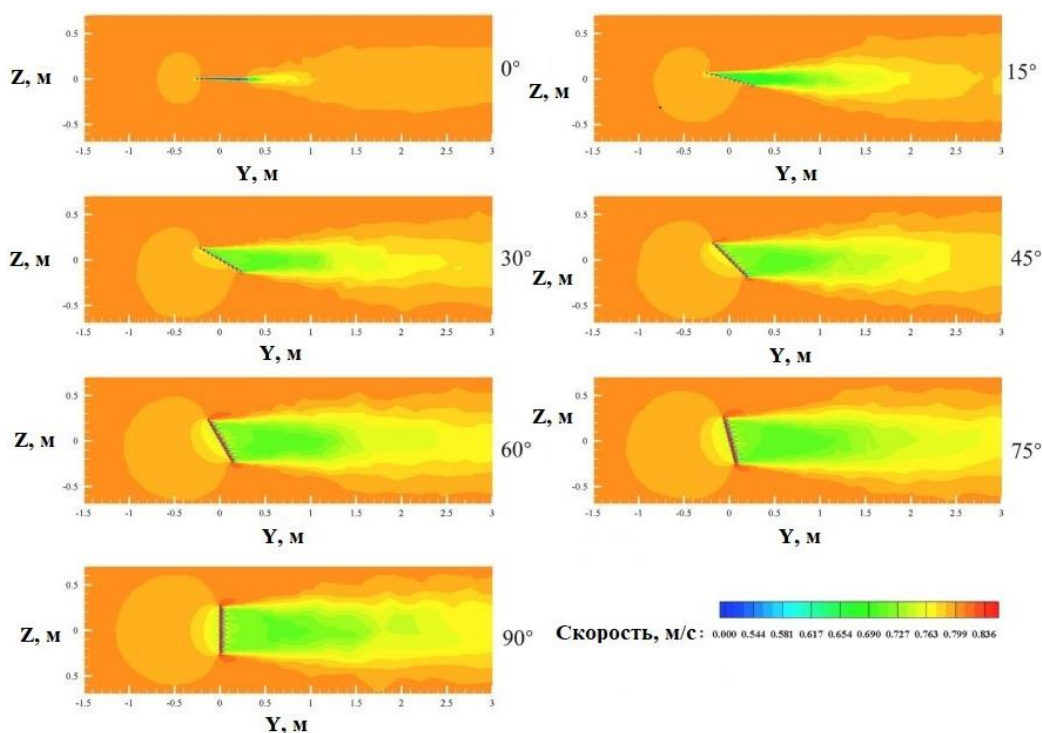


Рис. 4. Распределение скорости по сети при различных углах атаки. Составлено автором
Fig. 4. Velocity distribution through the netting in different attack angle. Compiled by the author

На рис. 6 показано, что распределение деформации сети слишком сконцентрировано в центре. Таким образом, сетка испытывает большую деформацию в своем центре по сравнению с другими частями сети.

В настоящее время невозможно определить шероховатость поверхности полиэтиленовой сети без узлов. Во время расчета шероховатость поверхности сетки была установлена равной 0,1 мм. Когда скорость потока ниже, трение между потоком воды и сетью приводит к увеличению силы сопротивления сети.

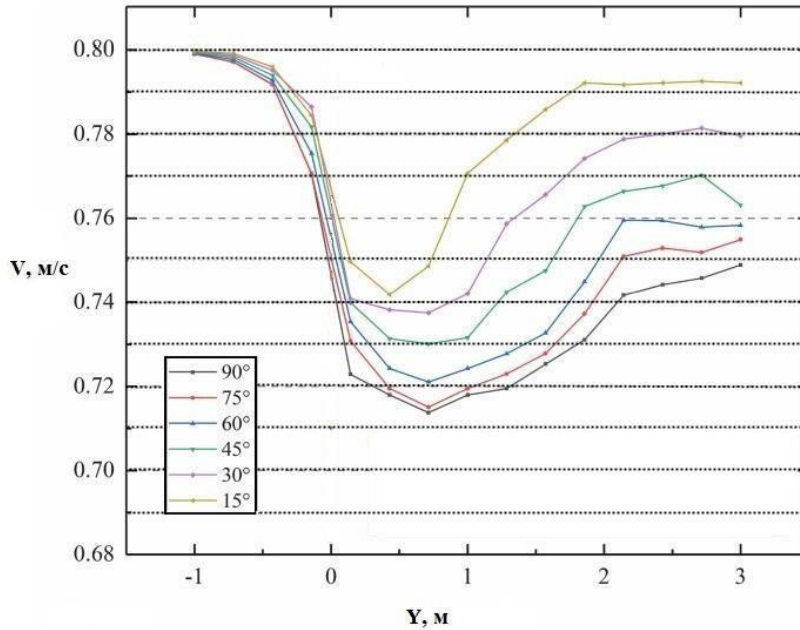


Рис. 5. Изменение потока вдоль центральной линии сетки при различном угле атаки. Составлено автором
 Fig. 5. Flow variation along central line through netting at different attack angle. Compiled by the author

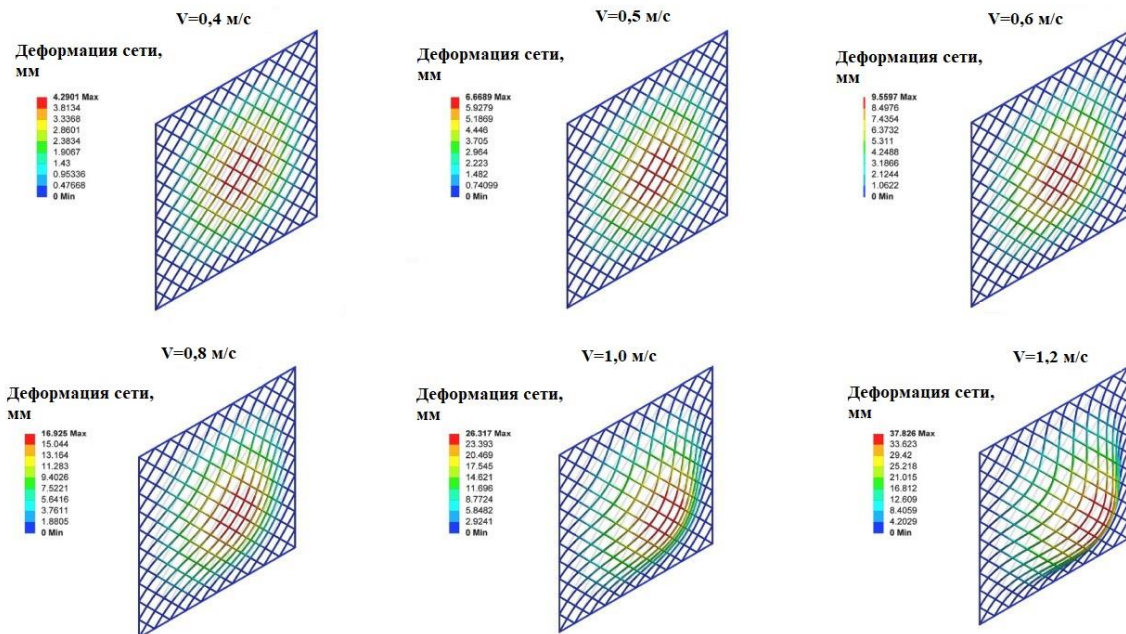


Рис. 6. Распределение деформации сетки. Составлено автором
 Fig. 6. The deformation distribution of netting. Compiled by the author

В этом исследовании использовалась нелинейная конечно-элементная модель конструкции с большой деформацией. Таким образом, текущие численные и предыдущие экспериментальные результаты [8] показывают, что использование сети с меньшим коэффициентом прочности (меньшим диаметром веревки с большим размером ячейки) приводит к меньшим гидродинамическим нагрузкам. Тип узла является важным фактором, который может сильно влиять на гидродинамические силы, действующие на рыболовную сеть. Таким образом, сравнивая наши результаты и [1, 6, 11], можно отметить, что преимущество сетей без узлов заключается в том, что они обладают меньшей гидродинамической силой по сравнению с узловым сетным полотном. Это существенное различие может быть объяснено тем, что турбулентный поток, возникающий в зоне кильватерного следа за сетью без узлов, менее важен по сравнению с потоком, возникающим за сетью с узлами.

В этом турбулентном пограничном слое происходит обмен энергией из-за перехода от ламинарного течения к турбулентному. В этой переходной зоне поток также имеет пограничный слой. Распределение скоростей, представленное на рис. 4, демонстрирует те же характеристики, что и поле течения, показанное в предыдущих исследованиях.

Что касается деформации гибкой сетной конструкции, то целью настоящего исследования было смоделировать полиэтиленовую сеть, чтобы увидеть, можно ли предсказать деформацию сети для заданных гидродинамических сил.

На рис. 6 показано, что прогиб локализован в середине сети в зоне удара, а сопротивление, оказываемое на сеть, равномерно распределено по всем направлениям. Это объясняется тем, что полиэтиленовая сеть очень жесткая, а изгибы между ячейками обеспечивают высокую гибкость. Результаты этого исследования показывают, что деформированная сеть является важным фактором, влияющим на лобовое сопротивление.

На деформацию сети влияют многие факторы, такие как эластичность материала, коэффициент прочности, плотность материала и модуль Юнга [12].

Заключение

Модель $k-\omega$ SST была применена для описания поля течения через сеть и расчета гидродинамических сил, действующих на сеть, а для описания деформации структуры сетки использовался нелинейный структурный метод конечных элементов с большой деформацией.

Поток в области следа полностью турбулентный из-за сетчатого следа. Снижение скорости за сеткой и в зоне кильватерного следа варьировалось от 10 % вблизи сети до 5 % вдали от сети. Эта скорость увеличивается по мере уменьшения угла атаки, что приводит к снижению коэффициента лобового сопротивления.

Результаты исследования демонстрируют, что деформация безузловой полиэтиленовой сетки под воздействием потока жидкости приводит к изменению ее геометрических характеристик и, как следствие, к изменению параметров потока. Учет этой связи позволяет более точно моделировать эти процессы и предсказывать поведение системы в различных условиях.

Таким образом, данное исследование вносит значительный вклад в понимание механизмов взаимодействия жидких тел и может быть использовано для разработки новых подходов к моделированию и оптимизации конструкций, подверженных воздействию потоков жидкости.

Список источников

1. Конинская А. Е. Использование безузловых сетных полотен в ставном неводе // Рыболовство – аквакультура : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых [Электронный ресурс]. Владивосток : Дальрыбвтуз, 2021. С. 10–13.

2. Пилипчук, Д. А. Оценка нахождения гидродинамических коэффициентов с использованием вычислительной гидродинамики / Д. А. Пилипчук, Т. Н. Веренич, Ю. А. Григорьева // Научные труды Дальрыбвтуза. 2022. Т. 62, № 4. С. 94–101. EDN EQIWDN.
3. Khawaja H. A. et al. Fluid solid interaction simulation of CFRP shell structure. – 2017.
4. Чжан и др. [Zhan J. M. et al. Analytical and experimental investigation of drag on nets of fish cages // Aquacultural engineering. 2006. Т. 35, №. 1. С. 91–101.]
5. Tang, H., Hu, F., Xu, L., Dong, S., Zhou, C., Wang, X., 2019. Variations in hydrodynamic characteristics of netting panels with various twine materials, knot types, and weave patterns at small attack angles. Sci. Rep. 9, 1923. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-35907-1>.
6. Гидродинамика узловых делей / А. А. Недоступ, А. О. Ражев, П. В. Насенков [и др.] // Рыбное хозяйство. 2024. № 5. С. 115–120. DOI 10.36038/0131-6184-2024-5-115-120. EDN CRZZXK.
7. Гидродинамика сетных жестких безузловых конструкций / А. А. Недоступ, А. О. Ражев, П. В. Насенков [и др.] // Рыбное хозяйство. 2023. № 3. С. 96–102. DOI 10.37663/0131-6184-2023-3-96-102. EDN QVFKOA.
8. Пилипчук, Д. А. Влияние угла наклона сети на её гидродинамические характеристики / Д. А. Пилипчук, Т. Н. Веренич // Научные труды Дальрыбвтуза. 2023. Т. 66, № 4. С. 125–132. DOI 10.48612/dalrybvtuz/2023-66-15. EDN ACRVIK.
9. Menter F.R. TwoEquation EddyViscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32, № 8. P. 1598–1605.
10. Савин М. А. Анализ моделей турбулентности, используемых в газодинамических, тепловых и прочностных расчетах турбин газотурбинного двигателя. // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. 2023. № 1. С. 26–47. DOI: 10.15593/2499-9873/2023.1.01.
11. Осипов Е. В., Пилипчук Д. А. Исследование синтетических нитей с учетом узловых соединений // Научно-практические вопросы регулирования рыболовства. 2019. С. 46–48.
12. Бородин П. А. Рыболовные материалы : учеб. пособие. Владивосток : Дальрыбвтуз, 2006. 78 с.

Сведения об авторе

Д. А. Пилипчук – старший преподаватель кафедры промышленного рыболовства.

Information about the author

D. A. Pilipchuk – Senior Lecturer of the Department of Industrial Fisheries.

Статья поступила в редакцию 26.11.2025; одобрена после рецензирования 02.12.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 26.11.2025; approved after reviewing 02.12.2025; accepted for publication 02.12.2025.