

## ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ГИДРОДИНАМИКЕ СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.А. Недоступ (Калининград), А.О. Ражев (Новосибирск),  
Е.И. Сергеев (Калининград)

**Введение.** В промышленном рыболовстве и рыбоводстве сетчатые конструкции находят широкое применение в орудиях рыболовства [1, 2], садках аквакультуры [3–5] и других инженерных сооружениях [6–10]. В промышленном рыболовстве сетчатые конструкции применяются с целью заграждения или фильтрации гидробионтов. В первом случае – это стационарные орудия рыболовства, которые облавливают частичковые виды рыб. Во втором случае это селективные решетки рыболовных тралов и сортирующие устройства [11–14], а также конструкции, уменьшающие гидроподпор в трале, препятствующий заход в него рыбы. На рис. 1 изображена селективная решетка с продольными связями (прутьями) для тралового лова трески.

Сетчатые конструкции представляют собой жесткие инженерные сооружения, при этом жесткость стержней может отличаться на порядки. Принято считать, что при малых числах модуля упругости (продольного и поперечного)  $E$  сетчатые конструкции называются сетчатыми конструкциями.

Для определения гидродинамических характеристик сетчатых конструкций применяются различные методы:

- физический эксперимент [15, 16];
- численный эксперимент [17, 18].

При физическом эксперименте для определения гидродинамических полей (скоростей и давления) необходима дорогостоящая измерительная аппаратура, позволяющая измерять поля скоростей и давлений вблизи элементов сетчатых конструкций. Точность результатов эксперимента зависит как от точности измерительного оборудования, так и от степени соответствия условий эксперимента натурным условиям. Кроме того, физический эксперимент требует значительных временных затрат.

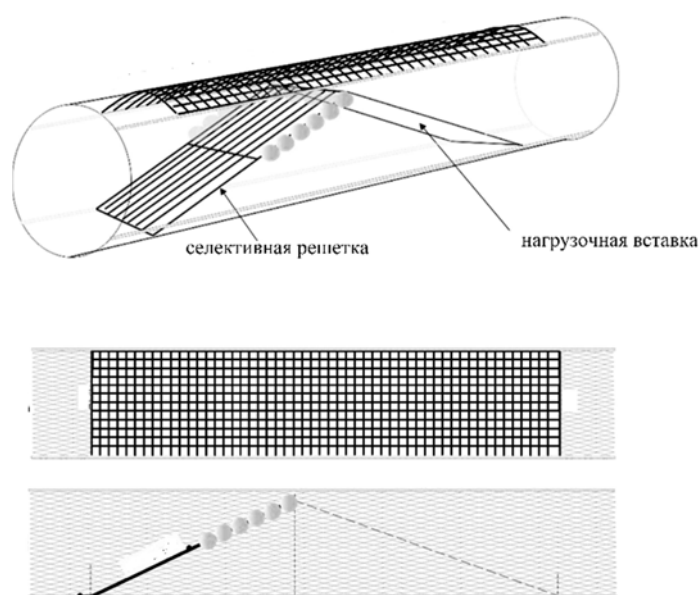


Рис. 1. Селективная решетка в трале для лова трески

При численном эксперименте финансовые и временные затраты значительно меньше. Имитация условий эксперимента определяется математической моделью, имеет как правило большую степень соответствия натурным условиям, а также возможность масштабируемости и гибкость при подборе параметров модели. Степень соответствия имитационной модели и природы в большей мере зависит от адекватности математической модели, ее способности учета влияния различных физических характеристик моделируемого процесса на результат [19, 20].

**Материалы и методы.** Проведем численные эксперименты на безузловых сетчатых конструкциях с квадратной формой ячеей при различных условиях с целью получения качественных результатов по давлению (в безразмерной форме) на поверхности сетчатой конструкции. На рис. 2 приведена схематизация безузловой сетчатой конструкции.

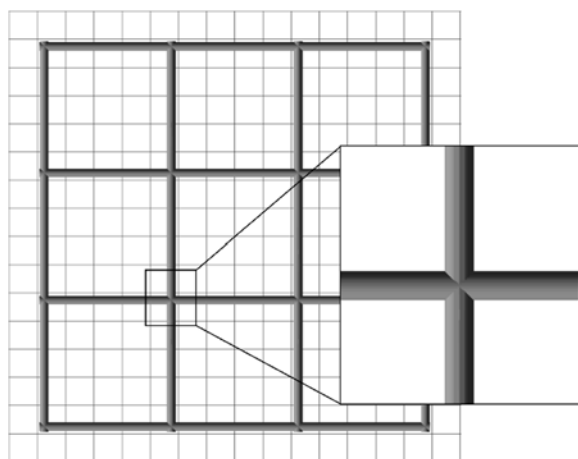


Рис. 2. Схематизация безузловой сетчатой конструкции

Численный эксперимент выполнялся в разработанном авторами программном обеспечении «Гидродинамика сетчатых конструкций», которое написано на языке C++ в среде разработки программного обеспечения Embarcadero RAD Studio. На рис. 3 изображены расчетная область и граничные условия.

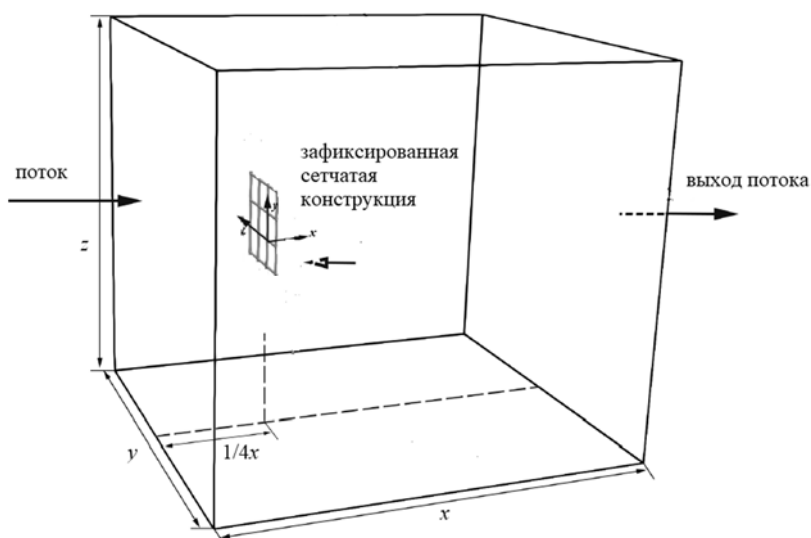


Рис. 3. Расчетная область и граничные условия

Расчет проводился на основе системы дифференциальных уравнений в частных производных Навье-Стокса (1)–(3), дополненной уравнением неразрывности (4), в которые было введено понятие искусственной сжимаемости среды (2):

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = \nu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = \nu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \nu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

$$\alpha \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где  $v_x, v_y, v_z$  – проекции скорости в узле расчетной сетки на оси координат в ортогональном базисе;  $\nu$  – кинематическая вязкость воды;  $p$  – давление (относительное) в узле расчетной сетки;  $\alpha$  – коэффициент искусственной сжимаемости среды;  $t$  – время.

Расчет проводился на регулярной расчетной сетке неявным конечно-разностным методом с ограничениями первого рода по полю скоростей на границах расчетной сетки  $\Gamma$  и на поверхности элементов сетчатой конструкции  $\Gamma_d$ , с ограничениями первого рода по полю давлений на границах расчетной сетки  $\Gamma$

$$\begin{aligned} v_{\Gamma x} &= \nu; v_{\Gamma y} = 0; v_{\Gamma z} = 0 \\ v_{Dx} &= 0; v_{Dy} = 0; v_{Dz} = 0 \\ p_{\Gamma} &= 0 \end{aligned}$$

где  $\nu$  – скорость потока жидкости, ориентированного по направлению оси координат  $x$ .

Начальные значения поля скоростей и давлений:

$$\begin{aligned} v_x &= \nu; v_y = 0; v_z = 0 \\ p_{\Gamma} &= 0 \end{aligned}$$

При расчете использовалось покоординатное расщепление уравнений (1) – (3) по базисным векторам с получением  $12n$  более простых уравнений, где  $n$  – количество узлов расчетной сетки, последующей линеаризацией нелинейных уравнений, выделением нелинейных коэффициентов и получением трехдиагональных систем линейных алгебраических уравнений. Для направления  $x$  получаем:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - \nu \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

$$v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} - \nu \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} = 0 \quad (6)$$

$$v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} - \nu \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} = 0 \quad (7)$$

$$\alpha \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial v_x}{\partial x} \quad (8)$$

Аналогично для направлений  $y$  и  $z$ . В (5) – (8) нижним подчеркиванием выделены нелинейные коэффициенты.

Для решения применялась следующая конечно-разностная аппроксимация частных производных:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} = \frac{\mathbf{v}_{[i+1,j,k]} - \mathbf{v}_{[i-1,j,k]}}{2\Delta x},$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial x^2} = \frac{\mathbf{v}_{i+1,j,k} - 2\mathbf{v}_{i,j,k} + \mathbf{v}_{i-1,j,k}}{\Delta x^2},$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \frac{\mathbf{v}_{i,j,k} - \mathbf{v}_{i-1,j,k}}{\Delta t},$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p_{i,j,k} - p_{i-1,j,k}}{\Delta t},$$

где  $\mathbf{v}$  – вектор скорости в узле расчетной сетки;  $i, j, k$  – индексы узлов расчетной сетки.

Алгоритм расчета во внутреннем цикле каждого временного слоя решает систему линейных уравнений методом прогонки, во внешнем – производит коррекцию нелинейных коэффициентов.

Коэффициент искусственной сжимаемости среды  $\alpha$  вводится с целью добавления системы уравнений с неизвестным давлением, связывающей давление со скоростью.

Условие завершения итерационного процесса на каждом временном слое, либо полного завершения в случае стационарного течения

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \rightarrow 0$$

с заданной расчетной погрешностью.

**Результаты.** В табл. 1 приводятся характеристики сетчатых безузловых конструкций, изготовленных из полистирола (ПС).

Таблица 1

Характеристики сетчатых безузловых конструкций ПС

Тип элемента	Модуль упругости при изгибе $E$ ГПа	Диаметр элемента $d$ мм	Шаг ячее (длина элемента) $a$ мм	Отношение $d/a$
Гладкий цилиндр	2,7	3,1	12,4	1/4
		3,1	24,8	1/8
		3,1	49,6	1/16

В табл. 2 приводятся характеристики потока.

Таблица 2

Характеристики потока

Жидкость	Плотность $\rho$ кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент кинематической вязкости $\nu$ м <sup>2</sup> /с	Скорость потока по оси OX $v$ м/с	Температура потока T °C
Вода	1000	$1,3 \cdot 10^{-6}$	1,0	18

На рис. 4–7 изображены результаты численного эксперимента при условии, что вектор скорости потока перпендикулярен плоскости ячеек сетчатой конструкции.

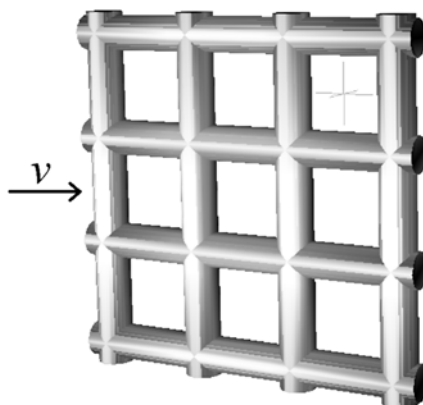


Рис. 4. Компьютерное моделирование сетчатой конструкции с некрученными элементами (сетка 9 ячеек, шаг ячеек 12,4 мм), вектор скорости потока расположен под углом 90°



Рис. 5. Компьютерное моделирование сетчатой конструкции с некрученными элементами (сетка 9 ячеек, шаг ячеек 24,8 мм), вектор скорости потока расположен под углом 90°

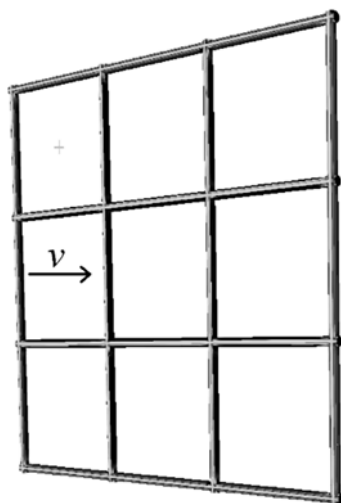


Рис. 6. Компьютерное моделирование сетчатой конструкции с некрученными элементами (сетка 9 ячеек, шаг ячеек 49,6 мм), вектор скорости потока расположен под углом 90°

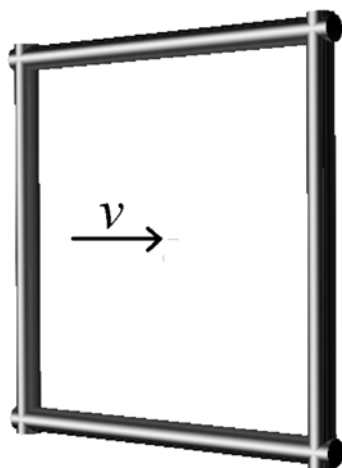


Рис. 7. Компьютерное моделирование сетчатой конструкции с некрученными элементами (сетка 1 ячейка, шаг ячеек 49,6 мм), вектор скорости потока расположен под углом 90°

На рис. 8–9 изображены результаты численного эксперимента при условии, что вектор скорости потока расположен под углом атаки 45° к плоскости ячеек сетчатой конструкции.

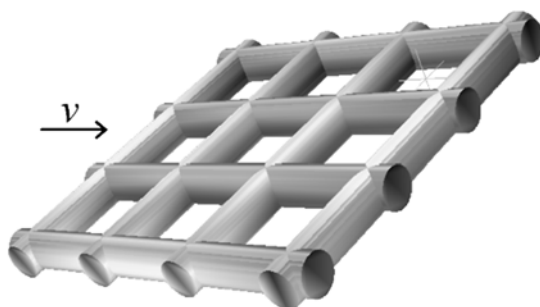


Рис. 8. Компьютерное моделирование сетчатой конструкции с некрученными элементами (сетка 9 ячеек, шаг ячеек 12,4 мм), вектор скорости потока расположен под углом 45°

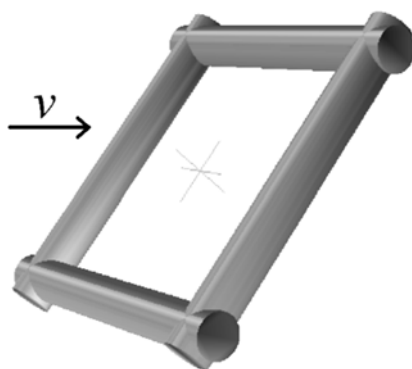


Рис. 9. Компьютерное моделирование сетчатой конструкции с некрученными элементами (сетка 1 ячей, шаг ячеей 24,8 мм), вектор скорости потока расположен под углом 45°

На рис. 4–9 результаты численных экспериментов представлены в виде качественных соответствий значений безразмерного давления на поверхности грациям серого. Минимальному давлению соответствует темный, максимальному – светлый.

#### Заключение

По качественной оценке распределения давлений по поверхности сетчатой конструкции в при заданных диапазонах скоростей и углов атаки, определяемых требуемыми характеристиками процесса траления, варьируя конструктивными параметрами (диаметром стержня, шагом ячеей, формой конструкции), можно осуществлять анализ на предмет выявления «слабых» мест и проводить оптимизацию конструкции в процессе эксперимента. В дальнейшем будет проведена количественная оценка поля давлений.

Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

#### Литература

1. Недоступ А.А., Ражев А.О. Моделирование орудий и процессов рыболовства. Ч. I: уч. пос. Калининград: Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ», 2019. 433 с.
2. Недоступ А.А., Ражев А.О. Моделирование орудий и процессов рыболовства. Ч. II: уч. пос. Калининград: Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ», 2019. 444 с.
3. Fredriksson D.W., Swift M.R., Irish J.D., Tsukrov I., Celikkol B. Fish cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurements. 2003. Aquacult. Eng. 27, pp.117–146.
4. Lader P.F., Enerhaug B. Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow. IEEE J. 2005. Oceanic Eng. 30 (1), pp. 79–84.
5. Suhey J.D., Kim N.H., Niezrecki C. Numerical modeling and design of inflatable structures-application to open-ocean-aquaculture cages. 2005. Aquacult. Eng. 33, pp. 285–303.
6. Сиромская Т.В., Сурков Н.А., Немидова А.А., Чагай Т.А., Гирн А.В. Технология изготовления сетчатых конструкций из композиционных материалов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Т. 1. 2019. С. 350–352.
7. Азаров А.В. Проблема проектирования аэрокосмических сетчатых композитных конструкций. Механика твердого тела. 2018. № 4. С. 85–93.
8. Ендогур А.И., Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.

9. **Giusto G., Totaro G., Spena P., De Nicola F., Di Caprio F., Zallo A., Grilli A., Mancini V., Kiryenko S., Das S., Mespoulet S.** Composite grid structure technology for space applications. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 34 (1), pp. 332–340.
10. **Хахленкова А.А.** Сетчатая цилиндрическая оболочка с круглым поперечным сечением и переменной жесткостью. *Вестник СибГАУ*, 2016, № 4, с. 1028–1036.
11. Рекомендации по применению сортирующей системы «Sort-V» на основе одной жесткой решетки при траловом промысле аркто-норвежской трески. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1996. 14 с.
12. **Шевченко А.И., Майсс А.А., Акимова О.В.** Анализ существующих средств селективности траловых систем на промысле минтая // *Научные труды Дальрыбвтуза*. Т. 32. 2014. С. 42–50.
13. <http://www.concept-ltd.ru/8760182841>
14. <http://sevrybproject.ru/ru/sortirovochnaya-sistema>
15. **Недоступ А.А.** Экспериментальная гидромеханика орудий рыболовства. М.: Моркнига, 2014. 363 с.
16. **Белов В.А.** Гидродинамика нитей, сетей и сетных орудий лова. Калининград: Изд. ОАО МариНПО и Калининградского технического университета. 2000. 202 с.
17. **Недоступ А.А., Ражев А.О.** Математическая модель взаимодействия распорной траловой доски с водной средой. *Морские интеллектуальные технологии*. №3(37) Т.1. 2017. С. 154–157.
18. **Zhou C., Xu L., Hu F., Qu X.** Hydrodynamic characteristics of knotless nylon netting normal to free stream and effect of inclination. *Ocean Eng.* 2015. 110, pp. 89–97.
19. **Zou B., Thierry N.N.B., Tang H., Xu L., Zhou C., Wang X., Dong S., Hu F.** Flow field and drag characteristics of netting of cruciform structures with various sizes of knot structure using CFD models. *Appl. Ocean Res.* 2021. 106, 102466.
20. **You X., Hu F., Takahashi Y., Shiode D., Dong S.** Resistance performance and uidow investigation of trawl plane netting at small angles of attack. 2021. *Ocean Eng.* 236, 109525.