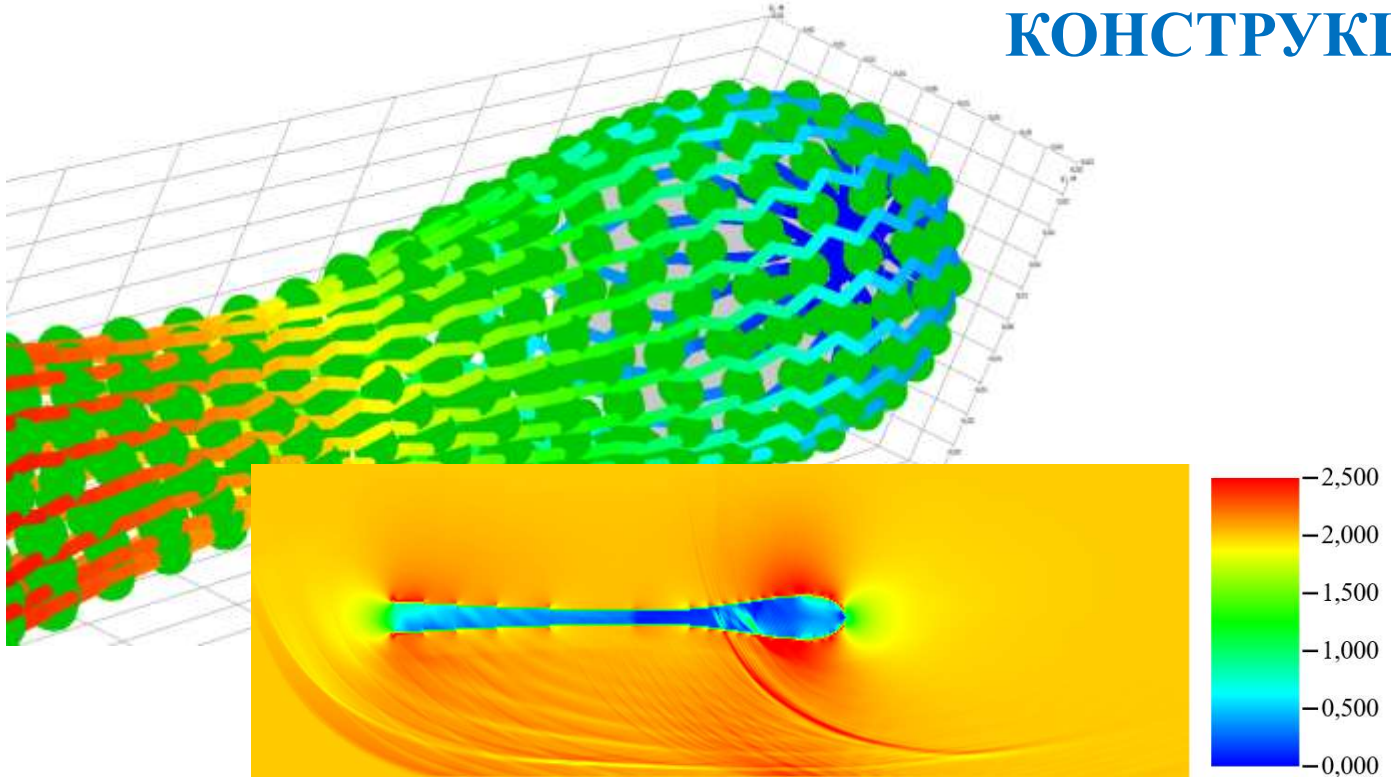
КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Фестиваль ВОИР: Наука и изобретения для жизни
Конференция «Отраслевая наука в действии»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИКИ СЕТНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ КОНСТРУКЦИИ



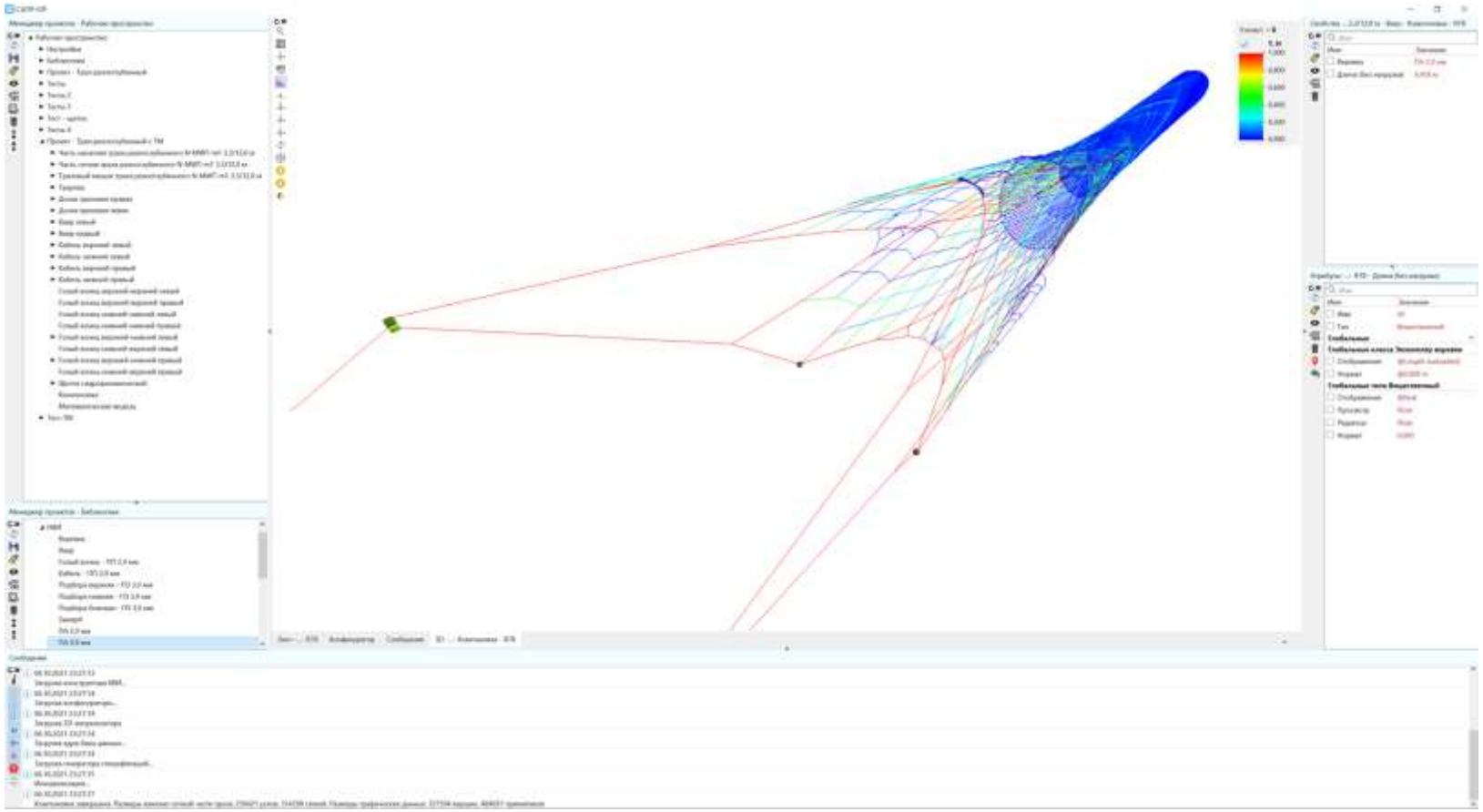
Авторы:
к.т.н. Ражев Алексей Олегович
к.т.н., доцент Недоступ Александр Алексеевич
Насенков Павел Владимирович
Коновалова Карина Витальевна

Докладчик:
к.т.н., доцент Недоступ Александр Алексеевич

Исследование выполнено в ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00008, https://rscf.ru/project/25-21-00008/

Введение

Рыболовный трал – сложная **сетная инженерная конструкция**, состоящая из канатной, сетной частей и **тралового мешка**. В процессе работы трал с уловом двигается в потоке воды. Гидромеханика трала определяется влиянием на него **внешних воздействий** в виде **потока воды** и накапливающегося в траловом мешке **улова**.

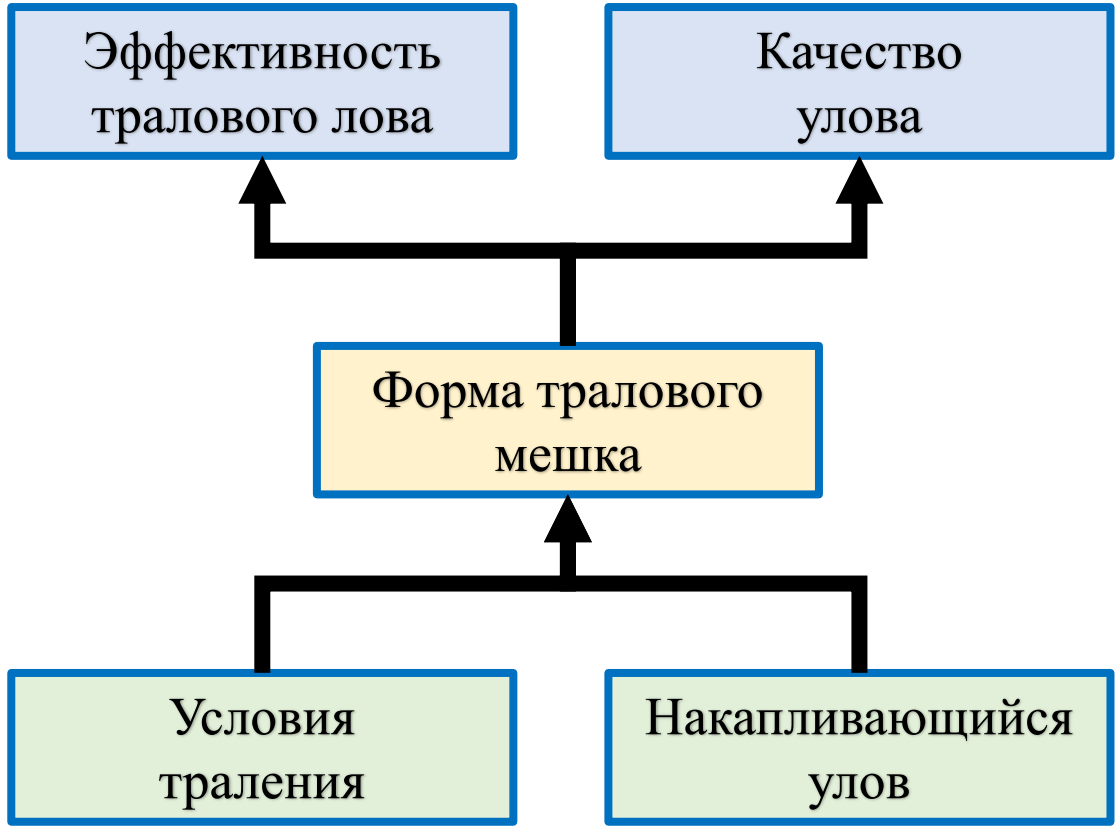


DigiTech Laboratory

лцт.рф

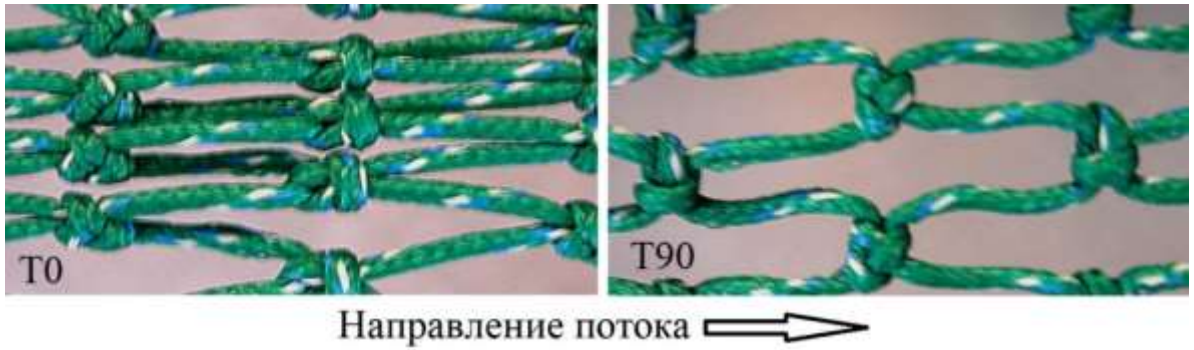
Расчет трала подготовлен в Системе автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства (САПР-ОР), разрабатываемой в ООО «ЛЦТ»

Введение



Проблема – влияние **гидроподпора** на форму тралового мешка. При увеличении скорости траления и объема улова увеличиваются радиальные силы сжатия тралового мешка, что приводит к уменьшению площади поперечного сечения и увеличению длины зоны прохода рыбы.

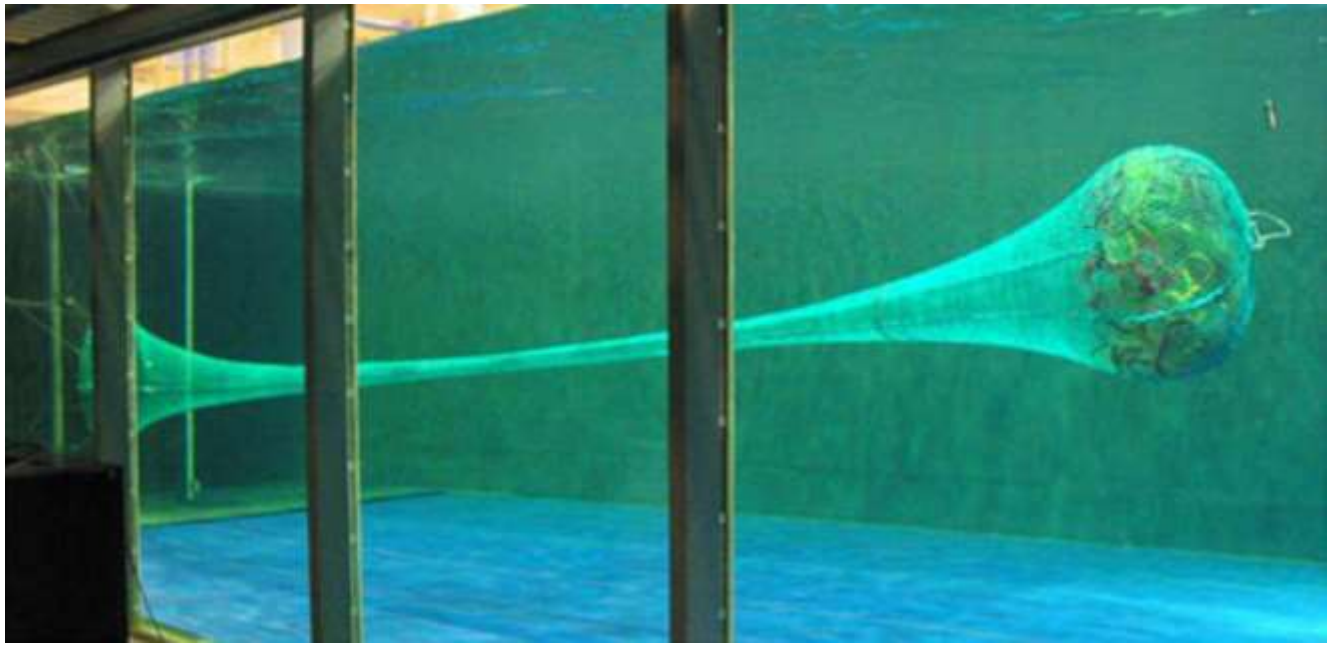
Решение - изменение ориентации ячеи мешка с **Т0** на **Т90**. При ориентации ячеи Т90 из-за увеличения площади зоны прохода рыбы тот же трал имеет **улучшенную селективность, вылавливает более крупную рыбу**. При этом **рыба меньше травмируется**, что **улучшает качество улова**.



Сайт проекта – https://digitechlab.ru/hydro

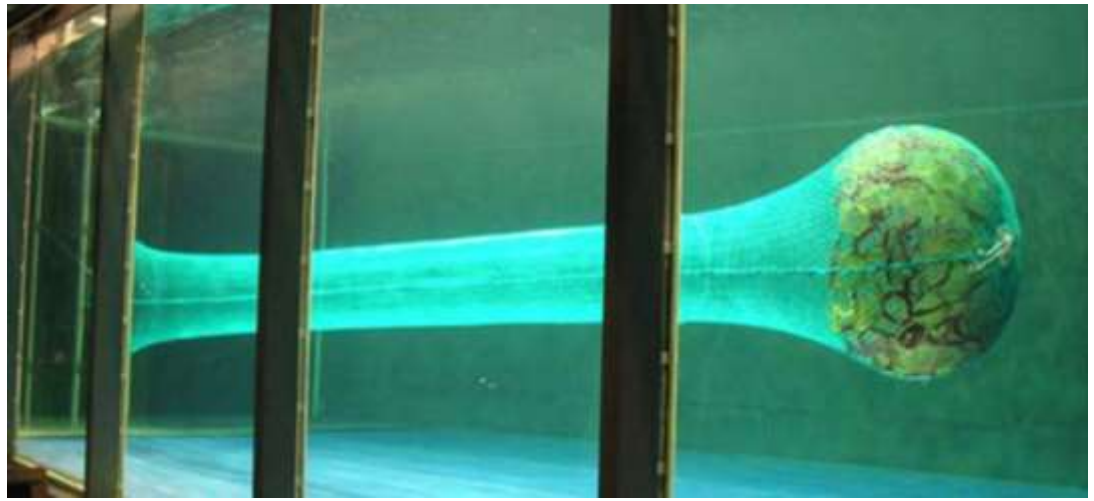
Введение

Эксперимент в гидроканале



Траловый мешок с имитацией улова при ориентации ячеи Т0

Материал веревок и **диаметр** тралового мешка, **шаг ячеи** и **количество ячей** по длине и окружности тралового мешка, а также **скорость** потока и **объем улова** в обоих случаях **одинаковы**.



Траловый мешок с имитацией улова при ориентации ячеи Т90

Постановка задачи

Оценка влияния ориентации ячеи по отношению к потоку жидкости на форму тралового мешка

Натурный и модельный эксперимент

Требует наличия гидроканала и сложного измерительного оборудования, много времени для подготовки и проведения

Численный эксперимент

Позволяет значительно ускорить и удешевить процесс оценки

Задача - посредством **математического моделирования** определить **форму** сетной конструкции с различной **ориентацией ячей** и **нагрузки** в ее элементах как в **числовом**, так и в **графическом** представлениях.

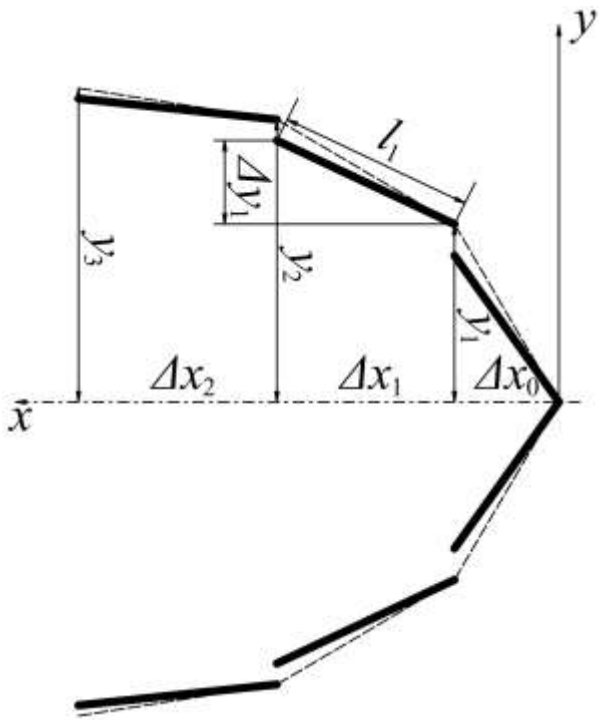
Условия

- траловый мешок – **осесимметричная** сетная конструкция;
- элементы-веревки **прямые** и **растяжимые** по закону Гука;
- элементы-узлы **абсолютно жесткие**;
- **плотность** элементов и улова близка к плотности воды;
- силы **гидродинамического** сопротивления многократно превышают **гидростатические**;
- силы приложены к узлам.

Математическая модель

С учетом **условий задачи** гидростатическими силами можно **пренебречь**, а задачу свести к расчету в **двухмерной системе координат**, что уменьшит трудоемкость вычислений и ускорит процесс моделирования и получения результата.

Пронумеруем ряды узлов в направлении оси *Ox*: $i = [0 \ldots 2m]$.



Проекция части сетной конструкции в расчетной плоскости

Начальные условия

$$x_0 = 0,\ y_0 = 0,\ y_{2m} = D/2,$$

Зависимости, связывающие геометрические характеристики сетной конструкции

$$l_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2},$$

$$\Delta x_i = x_{i+1} - x_i,\ \Delta y_i = y_{i+1} \cos\frac{\pi}{n} - y_i,$$

m – количество ячей вдоль оси сетной конструкции;
n – количество ячей вдоль окружности сетной конструкции;
i – порядковый номер ряда;
D – диаметр левого ряда;
l_i – расстояние между узлами сети в плоскости *Oxy*;
Δx_i, Δy_i – проекции l_i на оси координат.

Все чертежи подготовлены в Системе автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства (САПР-ОР), разрабатываемой в ООО «ЛЦТ»

Математическая модель

Улов

Проведем оценочное влияние улова заданного объема на геометрию тралового мешка. Считаем, что форма улова является полусферой, обращенной вогнутой частью навстречу потоку жидкости, улов обладает свойствами жидкости, а давление внутри него распределено равномерно.

$$P = c_{хк}\frac{\rho v^2}{2}$$

$$V = \sum_{i=0}^{k-1} V_i + V_p$$

$$V_i = \frac{1}{3}\left(S_i + \sqrt{S_i S_{i+1}} + S_{i+1}\right)\Delta x_i$$

$$V_p = \frac{1}{3}\left(S_p + \sqrt{S_p S_k} + S_k\right)\left(x_p - x_k\right)$$

$$S_i = \frac{n}{2} y_i^2 \sin\frac{2\pi}{n}$$

$$S_p = \frac{n}{2} y_p^2 \sin\frac{2\pi}{n},$$

$$y_p = \left(x_p - x_k\right)\frac{\Delta y_k}{\Delta x_k} + y_k$$

P – давление, действующее со стороны жидкости;
$c_{хк}$ – гидродинамический коэффициент сопротивления улова, $c_{хк}$ = 1,2;
V – объем улова;
V_i – объем ряда i;
V_p – объем улова в последнем заполненном ряде $i = k$;
S_i, S_{i-1}, S_k – площади сечения i-го, i-1 и k-го ряда соответственно;
S_p – площадь сечения ряда на уровне улова x_p;
y_p – радиус ряда на уровне улова x_p

Математическая модель

Улов

Силы внешнего воздействия, вызванные давлением улова

$$s_i = \frac{1}{2} l_i \left(y_i + y_{i+1} \right) \sin \frac{\pi}{n}$$

ряд *i* = 0

$$F_{x0} = P s_0 \frac{\Delta x_0}{l_0}$$

$$F_{y0} = 0$$

ряд *i* = *k*

$$F_{xi} = \frac{1}{2} P \left(s_p \frac{\Delta x_k}{l_k} + s_{k-1} \frac{\Delta x_{k-1}}{l_{k-1}} \right)$$

$$F_{yi} = \frac{1}{2} P \left(s_p \frac{\Delta y_k}{l_k} + s_{k-1} \frac{\Delta y_{k-1}}{l_{k-1}} \right)$$

$$s_p = \frac{1}{2} l_k \frac{x_p}{x_k} \left(2 y_k + \Delta y_k \frac{x_p}{x_k} \right) \sin \frac{\pi}{n}$$

ряды *i* = [1…*k*-1]

$$F_{xi} = \frac{1}{2} P \left(s_i \frac{\Delta x_i}{l_i} + s_{i-1} \frac{\Delta x_{i-1}}{l_{i-1}} \right)$$

$$F_{yi} = \frac{1}{2} P \left(s_i \frac{\Delta y_i}{l_i} + s_{i-1} \frac{\Delta y_{i-1}}{l_{i-1}} \right)$$

ряды *i* = [*k*+1…2*m*-1] без улова

$$F_{xi} = 0, \;\; F_{yi} = 0$$

s_p – часть площади ряда *k* до уровня улова, приходящаяся на одну веревку

Математическая модель

Гидродинамические поля – основные уравнения гидродинамики

$$\nabla \bullet \mathbf{v} = 0$$

- уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \left(\mathbf{v} \bullet \nabla\right)\mathbf{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v}$$

- уравнение Навье-Стокса

v – вектор скорости потока жидкости в произвольной точке пространства (плоскости – для двумерного случая); t – время; ρ – плотность жидкости; *p* – давление жидкости в произвольной точке пространства (плоскости – для двумерного случая); ν – кинематическая вязкость жидкости.

Математическая модель

Гидродинамические поля – метод «вихрь – функция тока» (ω–ψ метод)

$$\omega = \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}$$ - определение вихря

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$ - определение функции тока

ω – вихрь; ψ - функция тока; v_x, v_y – проекции скорости потока жидкости в произвольной точке на плоскости

Математическая модель

Гидродинамические поля – основные уравнения ω–ψ метода

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + v_x \frac{\partial \omega}{\partial x} + v_y \frac{\partial \omega}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)$$

- уравнение Гельмгольца для вихря, решается методами **расщепления** и **прогонки**

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega$$

- уравнение Пуассона для функции тока, решается методами **Ричардсона** (на GPU) или **Либмана с верхней релаксацией** (на CPU)

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 2\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \right)^2 \right)$$

- уравнение Пуассона для давления

Математическая модель

Гидродинамические поля – начальные условия

$$v_x = v_w, \quad v_y = 0, \quad \omega = 0,$$

$$\psi(y) = \int v_w dy \qquad \psi(0) = 0$$

v_w – заданная скорость набегающего потока жидкости

Гидродинамические поля – граничные условия на границах расчетной сетки

$$\omega = 0$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = v_x$$ - на левой и правой границах

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = -v_y$$ - на верхней и нижней границах

Гидродинамические поля – граничные условия на поверхности сетной конструкции

$$\omega_b = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial \mathbf{n}^2}$$ - обобщенное условие Томма

$$\omega = F_O \omega_b + \omega_w$$

ω_b – вихрь на полностью непроницаемой стенке; **n** – вектор нормали к поверхности, направленный от сетной конструкции; F_O - сплошность сетной поверхности; ω_w – вихрь в жидкости

Математическая модель

Нахождение сил по полю давлений

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_p + \mathbf{R}_f \qquad \mathbf{R}_p = \iint_S F_O p\mathbf{n}ds \qquad \mathbf{R}_f = \iint_S F_O \rho\nu \frac{d\mathbf{v}_s}{d\mathbf{n}} ds$$

$\mathbf{R}_p$ – сила давления жидкости на конструкцию; $\mathbf{R}_f$ – сила трения жидкости о конструкцию; S – поверхность сетной конструкции; $\mathbf{n}$ – вектор нормали к элементарной поверхности ds, направленный от конструкции; $\mathbf{v}_s$ – проекция вектора скорости на плоскость, параллельную элементарной поверхности ds

Математическая модель

Алгоритм метода «вихрь – функция тока» (ω–ψ метода)

Для каждого временного шага

→ Нахождение поля вихря (решение уравнения Гельмгольца) → Нахождение поля функции тока (решение уравнения Пуассона) → Нахождение поля скоростей →

Для поля давлений и гидродинамических сил

→ Нахождение поля давлений (решение уравнения Пуассона) → Нахождение гидродинамических сил →

Численный эксперимент

Условия эксперимента

Конструктивные характеристики тралового мешка

№	Параметр	Обозначение	Значение
1	Количество ячей вдоль оси сетной конструкции	m	20
2	Количество ячей вдоль окружности сетной конструкции	n	10
3	Диаметр левого ряда	D	50 мм
4	Диаметр веревки	d	2 мм
5	Коэффициент утолщения узла	$k_у$	3
6	Модуль упругости веревки	E	1,1 ГПа

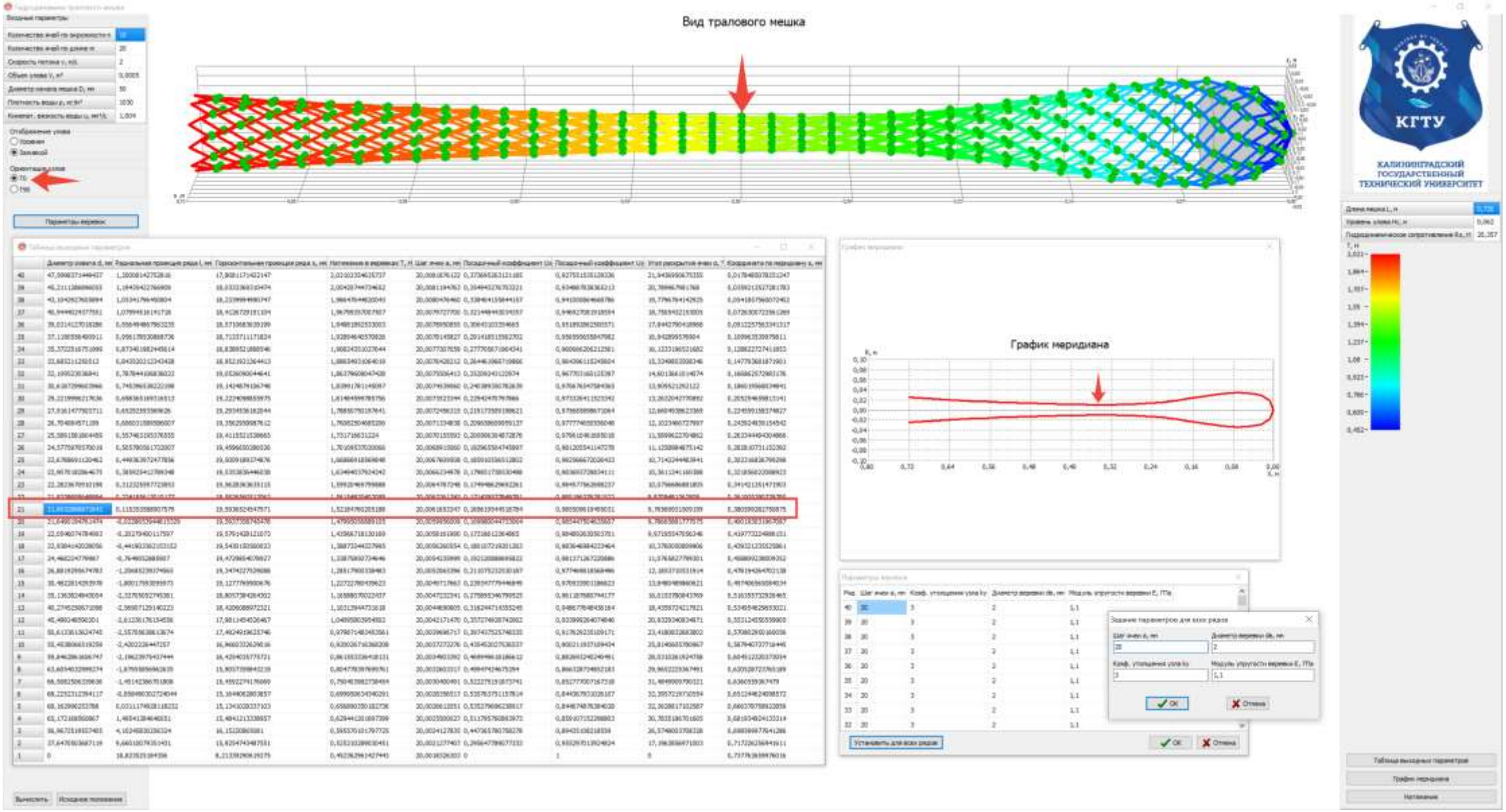
Параметры внешнего воздействия

№	Параметр	Обозначение	Значение
1	Скорость траления	v	2 м/с
2	Плотность воды	ρ	1030 кг/м^3
3	Кинематическая вязкость воды	υ	1,004 мм^2/с
4	Объем улова	V	500 см^3

Эксперимент проводился в разработанной программе для ЭВМ «**Гидродинамика тралового мешка**»

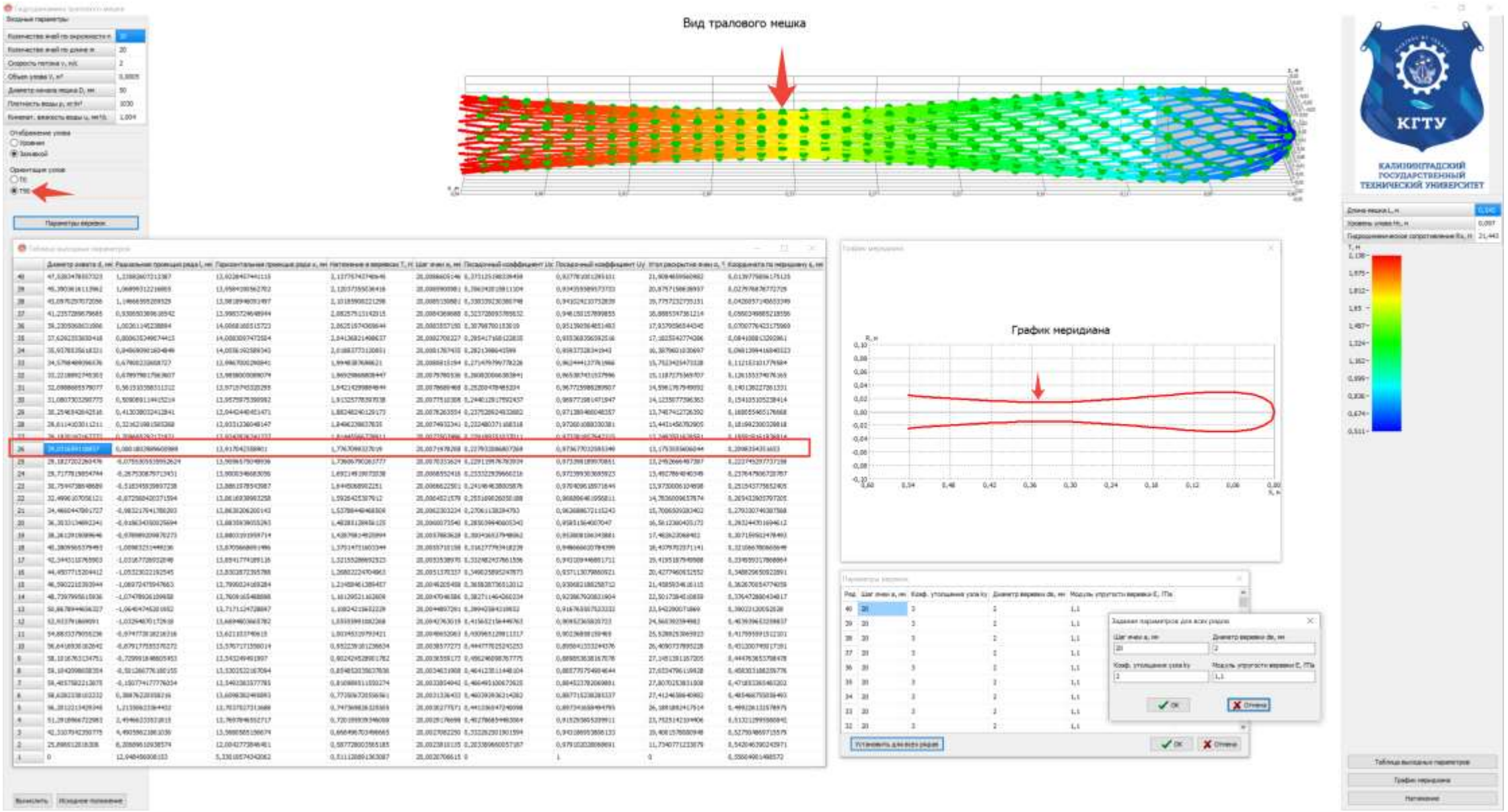
Численный эксперимент

Результаты численного моделирования тралового мешка с ориентацией ячеи Т0



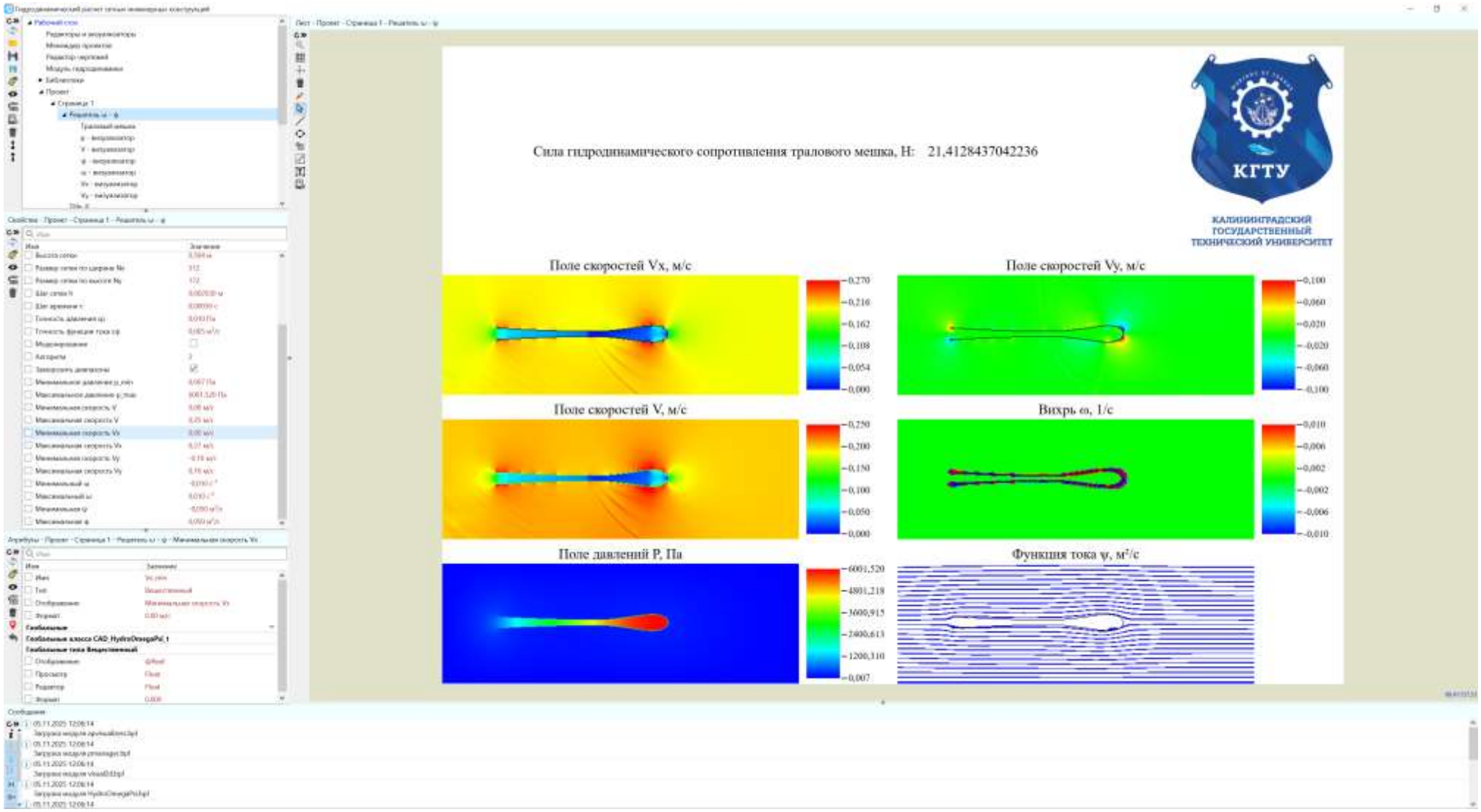
Численный эксперимент

Результаты численного моделирования тралового мешка с ориентацией ячеи Т90



Численный эксперимент

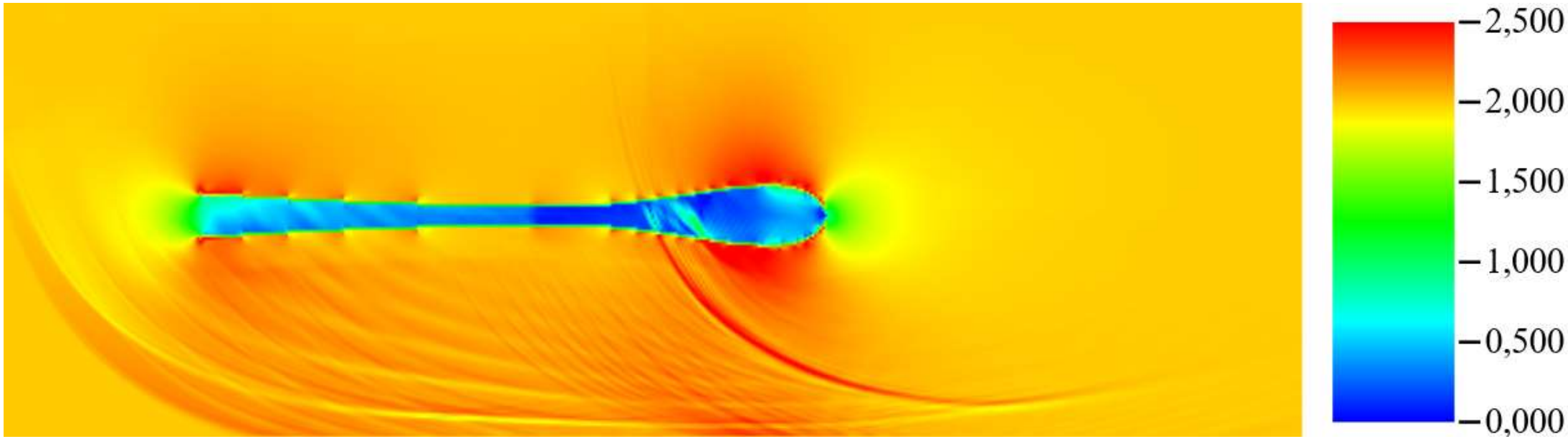
Результаты численного моделирования гидродинамических полей



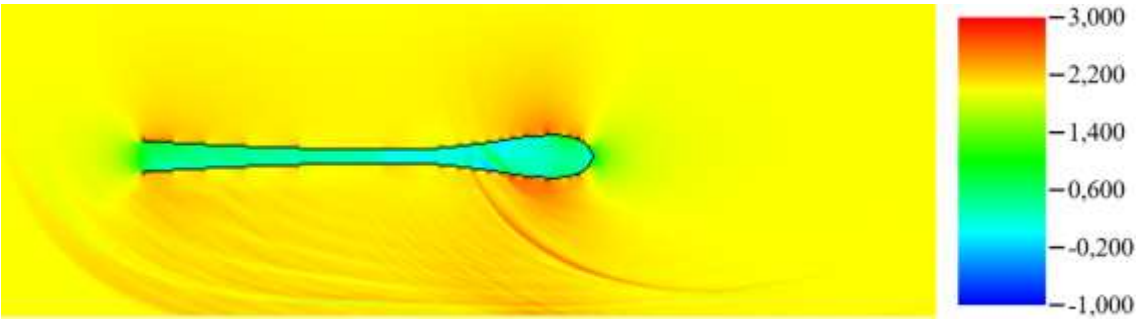
Численный эксперимент

Численное моделирование полей скоростей

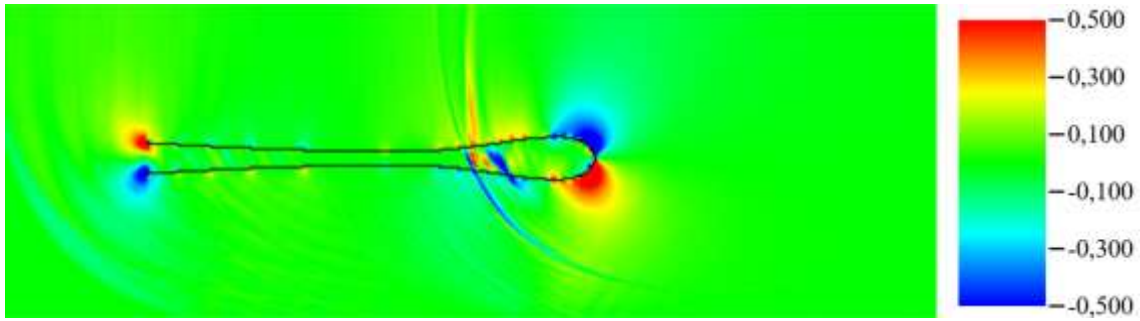
Модуль скорости



Горизонтальная составляющая скорости

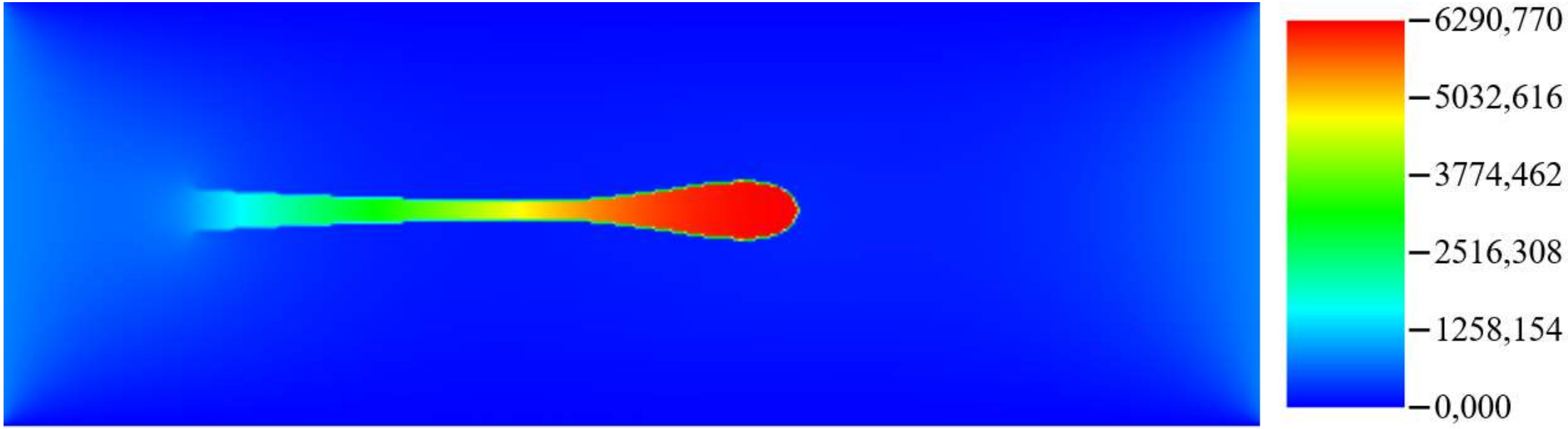


Вертикальная составляющая скорости



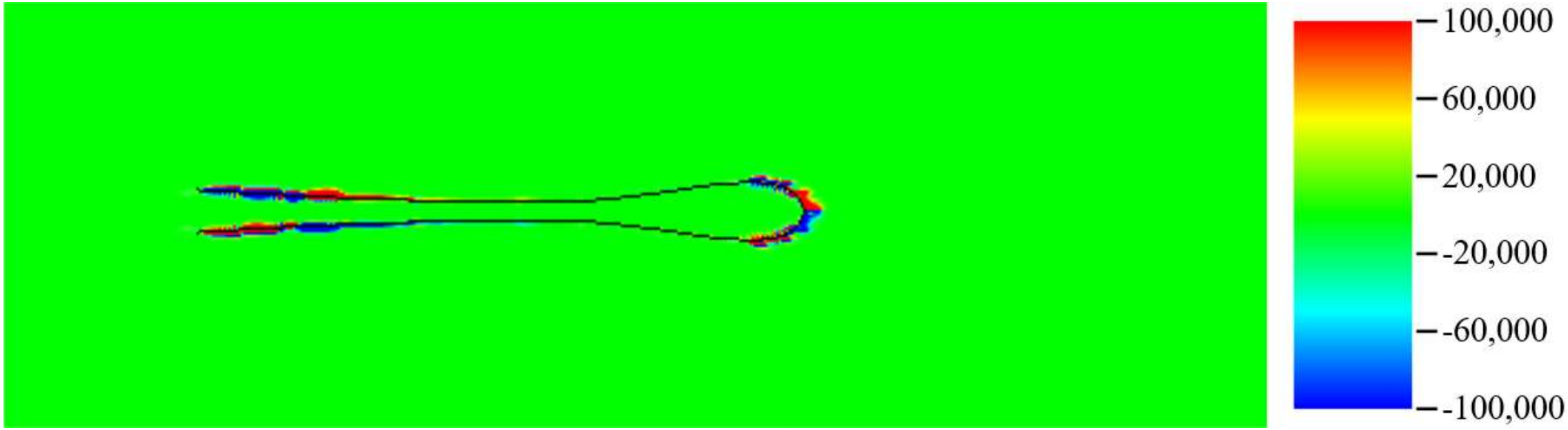
Численный эксперимент

Численное моделирование поля давления



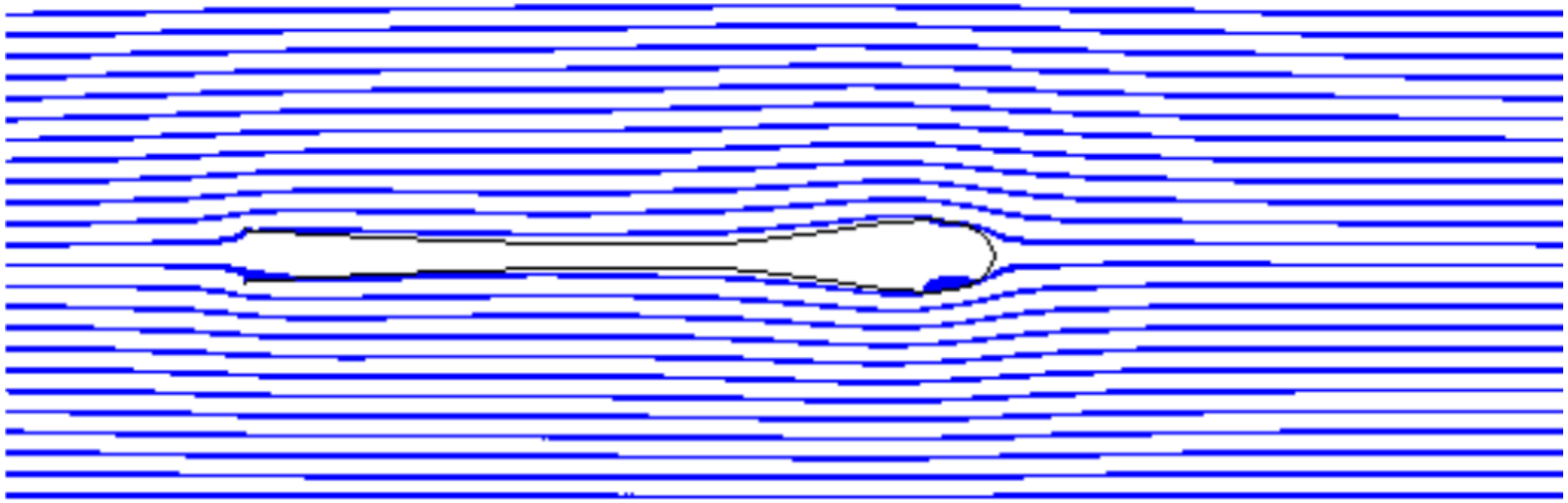
Численный эксперимент

Численное моделирование вихря



Численный эксперимент

Численное моделирование тока



Заключение

Научная новизна – сведение задачи к расчету в **двухмерной системе координат**, что уменьшит трудоемкость вычислений и ускорит процесс моделирования и получения результата.

Результаты

На разработанной программе для ЭВМ проведено численное моделирование.

При численным моделировании определено:

- минимальный диаметр тралового мешка при ориентации ячеи **Т0** составляет **21,6 мм**, что **меньше** диаметра при ориентации **Т90**, равного **29,0 мм**;
- длина зоны сужения при ориентации **Т90 меньше**, чем при **Т0**.

Область применения

научные исследования, учебный процесс, проектирование и эксплуатация рыболовных тралов.

Результаты исследования можно применять при проектировании и эксплуатации рыболовных тралов, в системах виртуальной реальности (тренажерных комплексах), дальнейших фундаментальных и прикладных научных исследованиях в области гидромеханики сетных инженерных конструкций в целом и орудий рыболовства в частности.

Приложение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

RU 2025687517

(12) **ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):
2025687517

Дата регистрации: **10.10.2025**

Номер и дата поступления заявки:
2025685119 11.09.2025

Дата публикации и номер бюллетеня:
10.10.2025 **Бюл. №** 10

Контактные реквизиты:
нет

Авторы:
Ражев Алексей Олегович (RU),
Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Насенков Павел Владимирович (RU),
Коновалова Карина Витальевна (RU)

Правообладатель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:
Расчет жесткостных и прочностных характеристик элементов сетной инженерной конструкции при внешнем воздействии

Реферат:
Орудия рыболовства являются сетными инженерными конструкциями, основу которых составляют связанные гибкие нитевидные элементы. При проектировании, расчете и моделировании таких сетных инженерных конструкций необходимо учитывать жесткость, упругость и прочность нитевидных элементов, в том числе разрывную нагрузку для минимизации аварийных ситуаций. Указанные физико-механические характеристики можно определить экспериментально с последующим расчетом. Компьютерная программа позволяет рассчитать жесткость, упругость, прочность нитевидных элементов по экспериментальным данным, полученных при внешнем воздействии на нитевидный элемент на разрывной машине. Область применения: научные исследования, учебный процесс, проектирование сетных инженерных конструкций. Тип ЭВМ: ПЭВМ с выходом в Интернет; ОС: Windows 10.

Язык программирования: Embarcadero RAD Studio, C++

Объем программы для ЭВМ: 11 МБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

RU2025685995

ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2025685995
Дата регистрации: 26.09.2025
Номер и дата поступления заявки:
2025685084 11.09.2025
Дата публикации и номер бюллетеня:
26.09.2025 Бюл. № 10

Автор(ы):
Ражев Алексей Олегович (RU),
Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Насенков Павел Владимирович (RU),
Коновалова Карина Витальевна (RU)
Правообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:
Гидродинамика тралового мешка

Реферат:
В процессе тралового лова возникает проблема, вызванная влиянием гидроподпора на форму тралового мешка. При увеличении скорости траления и объема улова увеличиваются радиальные силы сжатия тралового мешка, что приводит к уменьшению площади и увеличению длины зоны прохода рыбы. Проблема частично решается изменением ориентации ячей мешка с Т0 на Т90. Компьютерная программа позволяет рассчитать форму мешка и нагрузки в его элементах при различных конструктивных параметрах элементов тралового мешка, скорости траления, ориентации ячей, с последующей их визуализацией в трехмерном, двумерном и числовом представлениях. Область применения: научные исследования, учебный процесс, проектирование и эксплуатация рыболовных тралов. Тип ЭВМ ПЭВМ с выходом в Интернет. ОС: Windows 10.

Язык программирования: Embarcadero RAD Studio, C++

Объем программы для ЭВМ: 3500 КБ

Траловый мешок в потоке

Видео

Трал в потоке

Исследование гидродинамических полей при помощи PIV

Спасибо за внимание!