

УДК 639.2.081

**ОБЩЕЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ФОРМЕ,  
СОПРОТИВЛЕНИИ И НАТЯЖЕНИИ СЕТИ С ОДНОЙ  
НЕЗАКРЕПЛЕННОЙ ПОДБОРОЙ****Н. И. Алексеев**

Многие рыболовные орудия представляют собой сетное полотно, посаженное на две подборы, одна из которых закреплена, а другая свободна в потоке.

Для расчета таких орудий очень важно определить заранее, какую форму примет сеть под действием течения, какое будет натяжение сети и ее сопротивление потоку.

Эта сложная задача теории и расчета орудий рыболовства является объектом исследования на протяжении более двух десятилетий.

Первое приближенное решение задачи принадлежит проф. Ф. И. Баранову. Основываясь на имевшемся тогда представлении о сопротивлении сетей, Баранов принимал допущение, что на сеть, наклонно расположенную в потоке, действует только сила лобового сопротивления [1].

Позднее Баранов с помощью специально поставленного эксперимента определил, что в случае наклонного расположения в потоке на сеть действует, кроме того, распорная сила, составляющая до 20% от силы лобового сопротивления [2].

В дальнейшем два различных приближенных решения рассматриваемой задачи получили японские исследователи [7], [8], [9] и Б. А. Попов [5]. В этих решениях учитывалась уже и распорная сила сети. Однако исследователи не имели экспериментальных данных и рассчитывали распорную силу плоской сети, наклонно расположенной в потоке, аналитически, рассматривая сеть как сумму нитей [10], [6].

Позднейшие опыты по определению распорной силы плоских сетей, произведенные А. Н. Покровским [4], показали, что результаты таких расчетов значительно расходятся с экспериментальными данными.

Таким образом, задача о форме, натяжении и сопротивлении сети на течении до сих пор не имела точного решения.

Упомянутые выше опыты Баранова и Покровского дали качественные (сравнительные) данные о распорной силе, но не дали количественных результатов, поэтому не могли служить достаточным основанием для решения поставленной задачи.

Впервые количественные данные о распорной силе нескольких образцов плоских сетей, расположенных под углом к потоку, были получены К. Л. Павловым [3] при испытаниях на гидродинамической станции ВНИРО и в бассейне Института гидрологии и гидротехники АН УССР. Часть этих данных графически представлена на рис. 1.

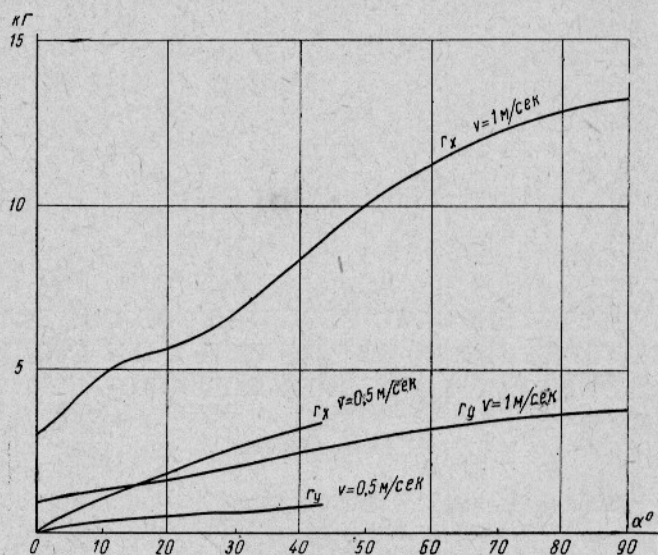


Рис. 1. Сопротивление и распорная сила 1 м<sup>2</sup> сетного полотна по данным Павлова.

Как видно из графиков, сопротивление  $r_x$  и распорная сила  $r_y$  плоского сетного полотна площадью 1 м<sup>2</sup> изменяются в зависимости от скорости потока и угла атаки сети  $\alpha$  (угла сети с направлением потока).

При любой постоянной скорости потока для каждого определенного образца сети с заданными коэффициентами посадки  $r_x$  и  $r_y$  зависят только от угла атаки сети. Эти зависимости могут быть представлены либо в виде таблиц, составленных по данным испытаний, либо в виде эмпирических формул  $r_x(\alpha)$ ,  $r_y(\alpha)$ , с какой-либо степенью точности отображающих экспериментальные данные.

Перейдем теперь к общему аналитическому решению поставленной задачи.

Пусть сеть, посаженная с постоянным коэффициентом посадки и закрепленная нижней подборой на грунте, под действием однородного потока постоянной скорости отклонилась от вертикального положения и приняла некоторую криволинейную форму.

Рассмотрим вертикальную полоску сети шириной 1 м (рис. 2). Примем эту полоску за гибкую нить и обозначим ее длину (по диагональной линии сети) за  $l$ .

Так как элементу  $dl$  нити соответствует участок сетной полоски площадью  $dl$  м<sup>2</sup>, то на него действуют следующие активные силы:

- а) сила лобового сопротивления сети  $r_x(\alpha)dl$ ;
- б) распорная сила сети  $r_y(\alpha)dl$ ;
- в) сила веса сети  $pdl$ .

и силы реакции — натяжения сети на концах элемента.

Дифференциальные уравнения равновесия сети в этом случае будут иметь вид:

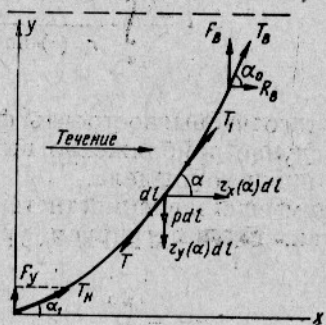
$$\frac{d}{dl} \left( T \frac{dx}{dl} \right) + r_x(\alpha) = 0;$$

$$\frac{d}{dl} \left( T \frac{dy}{dl} \right) - r_y(\alpha) - p = 0,$$

где  $T$  — натяжение сети по диагональной линии;

$p$  — вес в воде  $1 \text{ м}^2$  сетного полотна.

Рис. 2. Силы, действующие на сеть с закрепленной нижней подборой на течении.



Таким образом, задача о форме и натяжении сети на течении сводится к задаче о фигуре равновесия и натяжении гибкой нити в стационарном поле сил, зависящих от направления нити, и дополнительном воздействии поля сил тяжести.

Произведем подстановку

$$\frac{dx}{dl} = \cos \alpha, \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dl} = \sin \alpha$$

и преобразуем уравнения равновесия

$$\cos \alpha dT - T \sin \alpha d\alpha + r_x(\alpha) dl = 0,$$

$$\sin \alpha dT + T \cos \alpha d\alpha - r_y(\alpha) dl - p dl = 0.$$

После умножения этих уравнений на  $\sin \alpha$ ,  $\cos \alpha$  и почленных сложений и вычитаний уравнения равновесия сети примут следующий вид:

$$dT + r_x(\alpha) \cos \alpha dl - r_y(\alpha) \sin \alpha dl - p \sin \alpha dl = 0,$$

$$T d\alpha - r_x(\alpha) \sin \alpha dl - r_y(\alpha) \cos \alpha dl - p \cos \alpha dl = 0.$$

Из второго уравнения системы найдем

$$dl = \frac{T d\alpha}{r_x(\alpha) \sin \alpha + r_y(\alpha) \cos \alpha + p \cos \alpha}, \quad (2)$$

подставим в первое уравнение системы; получим уравнение с разделяющимися переменными

$$dT + T \frac{r_x(\alpha) \cos \alpha - r_y(\alpha) \sin \alpha - p \sin \alpha}{r_x(\alpha) \sin \alpha + r_y(\alpha) \cos \alpha + p \cos \alpha} d\alpha = 0.$$



Отсюда после интегрирования определим натяжение сети

$$\ln T(\alpha) = \int_{\alpha}^{\alpha_B} \frac{r_y(\alpha) \sin \alpha - r_x(\alpha) \cos \alpha + p \sin \alpha}{r_y(\alpha) \cos \alpha + r_x(\alpha) \sin \alpha + p \cos \alpha} d\alpha, \quad (3)$$

где  $\alpha_B$  — угол атаки сети у верхней подборы.

Определим зависимость длины сети от угла атаки. Для этого проинтегрируем уравнение (2), используя формулу (3):

$$l = \int_{\alpha}^{\alpha_B} \frac{T(\alpha) d\alpha}{r_x(\alpha) \sin \alpha + r_y(\alpha) \cos \alpha + p \cos \alpha}. \quad (4)$$

Для того чтобы построить форму сети, достаточно в каждом конкретном случае приближенно вычислить этот интеграл для нескольких значений нижнего предела.

Найдем еще зависимости текущих декартовых координат сети от угла атаки. Проинтегрируем уравнение (1), учитывая уравнение (4):

$$x = \int_{\alpha}^{\alpha_B} \frac{T(\alpha) \cos \alpha d\alpha}{r_x(\alpha) \sin \alpha + r_y(\alpha) \cos \alpha + p \cos \alpha}, \quad (5)$$

$$y = \int_{\alpha}^{\alpha_B} \frac{T(\alpha) \sin \alpha d\alpha}{r_x(\alpha) \sin \alpha + r_y(\alpha) \cos \alpha + p \cos \alpha}. \quad (6)$$

Формулы (3), (4), (5) и (6) дают полное параметрическое решение задачи о форме и натяжении сети с незакрепленной верхней подборой.

Необходимые начальные условия (угол атаки  $\alpha_B$  и натяжения  $T_B$  сети у верхней подборы<sup>1</sup>) найдем по формулам

$$\alpha = \arctg \frac{F_B}{R_B}, \quad T_B = \sqrt{F_B^2 + R_B^2}. \quad (7)$$

Расчет входящих сюда величин подъемной силы (плавучести)  $F_B$  и сопротивления  $R_B$  верхней подборы не представляет труда.

Общее сопротивление сети  $R_x$  и силу  $F_y$ , стремящуюся оторвать нижнюю подбору от грунта, определим по формулам

$$R_x = T_n \cos \alpha_n, \quad F_y = T_n \sin \alpha_n.$$

Входящие сюда величины натяжения  $T_n$  и угла атаки  $\alpha_n$  сети у нижней подборы найдем вычислением определенных интегралов (3) и (4) при известных начальных условиях (7).

Рассмотрим теперь сеть, верхняя подбора которой закреплена, а нижняя вместе с сетью отклоняется под действием течения. В этом случае распорная сила сети направлена в сторону, противоположную направлению поля сил тяжести.

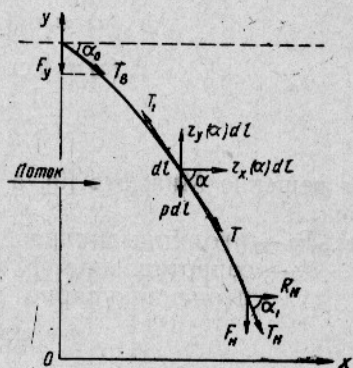
<sup>1</sup> Здесь и далее все расчеты ведутся для сетной полоски с длиной подбор по 1 м. Высота сети в посадке предполагается известной.

Дифференциальные уравнения равновесия такой сети в принятой системе координат (рис. 3) будут иметь вид:

$$\frac{d}{dl} \left( T \frac{dx}{dl} \right) + r_x(\alpha) = 0,$$

$$\frac{d}{dl} \left( T \frac{dy}{dl} \right) + r_y(\alpha) - p = 0.$$

Рис. 3. Силы, действующие на сеть с закрепленной верхней подборой на течении.



После решения этих уравнений получим следующие формулы для расчета формы, натяжения и сопротивления сети с незакрепленной нижней подборой:

$$\ln T(\alpha) = \int_{\alpha_H}^{\alpha} \frac{r_x(\alpha) \cos \alpha + r_y(\alpha) \sin \alpha - p \sin \alpha}{r_x(\alpha) \sin \alpha - r_y(\alpha) \cos \alpha + p \cos \alpha} d\alpha,$$

$$l = \int_{\alpha_H}^{\alpha} \frac{T(\alpha) d\alpha}{r_y(\alpha) \cos \alpha - r_x(\alpha) \sin \alpha - p \cos \alpha},$$

$$x = \int_{\alpha_H}^{\alpha} \frac{T(\alpha) \cos \alpha d\alpha}{r_y(\alpha) \cos \alpha - r_x(\alpha) \sin \alpha - p \cos \alpha}, \quad (8)$$

$$y = \int_{\alpha_H}^{\alpha} \frac{T(\alpha) \sin \alpha d\alpha}{r_y(\alpha) \cos \alpha - r_x(\alpha) \sin \alpha - p \cos \alpha},$$

$$R_x = T_B \cos \alpha_B, \quad F_y = T_B \sin \alpha_B.$$

здесь  $F_y$  — сила, стремящаяся потопить верхнюю подбору.

Начальные условия определяются тем же путем, только для нижней подборы

$$\alpha_H = \arctg \frac{F_H}{R_H}, \quad T_H = \sqrt{F_H^2 + R_H^2},$$

где  $R_H$  и  $F_H$  — соответственно сопротивление и углубляющая сила нижней подборы.

Полученное здесь общее аналитическое решение позволяет рассчитывать форму, натяжение и сопротивление сетей с какими угодно зависимостями  $r_x$  и  $r_y$  от угла атаки, в частности и в том случае, когда эти зависимости представлены в табличной форме. В последнем случае,

вычисляя интегралы (с помощью формул квадратур или с помощью разложения подинтегральных выражений в ряды), можно найти форму, натяжение и сопротивление сети с точностью, соответствующей точности экспериментального определения сопротивления и подъемной силы плоского сетного полотна.

Предыдущие решения рассматриваемой задачи были получены для конкретных приближенных зависимостей  $r_x$  и  $r_y$  от  $\alpha$ , а поэтому являются частными случаями изложенного здесь общего решения.

Так, например, положив в интегралах (8)

$$r_x(\alpha) = k(1 - \cos^2 \varphi \cos^2 \alpha),$$

$$r_y(\alpha) = k \cos^2 \varphi \sin \alpha \cos \alpha,$$

$$\alpha_n = \frac{\pi}{2}, \quad T_n = T_0,$$

получим решение Миамото [9], а для невесомой сети ( $p=0$ ) — решение Каваками [8].

Здесь  $\varphi$  — угол диагональной линии с нитями сети;

$k$  — сопротивление 1 м<sup>2</sup> сетного полотна, расположенного перпендикулярно потоку.

### ВЫВОДЫ

1. Аналитический расчет сопротивления, формы и натяжения сети с одной незакрепленной подборой в однородном потоке постоянной скорости в общем случае сводится к вычислению определенных интегралов.

2. Формулы полученного решения позволяют найти натяжение, форму и сопротивление сети с точностью, ограниченной в каждом конкретном случае лишь точностью экспериментального определения сопротивления и распорной силы плоского сетного полотна.

3. Предыдущие решения рассмотренной задачи, основанные на приближенных отображениях зависимости распорной силы и сопротивления плоского сетного полотна от угла атаки сети, являются частными случаями изложенного здесь общего решения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Ф. И. Теория и расчет орудий рыболовства, Пищепромиздат, 1948.
2. Баранов Ф. И. К вопросу о сопротивлении воды движению веревок и сетей. «Рыбное хозяйство», 1948, № 1.
3. Павлов К. Л. Экспериментальное определение гидродинамических характеристик сетного полотна. Труды ВНИРО. Т. 47, 1962.
4. Покровский А. Н. Опыты по определению распорной силы плоской сети при движении ее в воде. Труды ВНИРО. Т. 41, 1959.
5. Попов Б. А. Расчет сопротивления и загрузки сетей с одной незакрепленной подборой. Труды ВНИРО. Т. 30, 1955.
6. Попов Б. А. О подъемной силе сети, помещенной в поток. Труды ВНИРО. Т. 30, 1955.
7. Fujita H. The drag action on a net in a uniform current. II. Memoirs of the college of agriculture. Kyoto university. 66, 1953, 11.
8. Kawakami T. Equilibrium configuration of a rectangular strip of a net subjected to a uniform current. Memoirs of the college of agriculture. Kyoto university. 72, 1955, 1.
9. Miyamoto H. Study on the set-net. Bulletin of the Tokai regional fishing research laboratory. 2, 1951, 1.
10. Tauti M. The force acting on the plane net in a motion through the water. Bulletin of the Japanese Society of scientific fisheries. 3(1), 1934, 1.