

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЗАГРУЗКИ СЕТЕЙ С ОДНОЙ НЕЗАКРЕПЛЕННОЙ ПОДБОРОЙ

Канд. техн. наук Б. А. ПОПОВ

Всякая рыболовная сеть при погружении в поток принимает форму некоторой кривой поверхности, определяемой структурой сети и характером действующих на нее сил. Определение этой формы — вопрос в достаточной мере сложный. Этим, очевидно, и объясняется тот факт, что все исследования до настоящего времени проводились с плоскими образцами сетей, вследствие чего из рассмотрения исключался фактор формы и решение вопроса значительно упрощалось.

Но для практики важно уметь произвести расчет сетей именно неплоской формы, то есть связать единой зависимостью элементы, определяющие форму сети, с сопротивлением ее в потоке и размерами оснастки, необходимой для придания сети заданной формы.

Сопротивление сети при условиях, обеспечивающих свободную фильтрацию воды сквозь сетное полотно, может быть рассчитано как сумма сопротивлений составляющих сеть нитей. Это условие, на основании опытных данных Н. А. Рынина [5], определяется неравенством

$$\frac{F_{net}}{F_{br}} < 0,5, \quad (1)$$

где: F_{net} — затененная площадь сети, то есть сечение потока, перекрытое сетными нитками;

F_{br} — габаритная площадь сети, или сечение потока, охватываемое периметром сети.

Следовательно, прежде чем перейти к рассмотрению сопротивления неплоской сети в потоке воды, необходимо рассмотреть вопрос о форме и сопротивлении гибкой нити при действии на нее гидродинамической нагрузки.

Поскольку свободно расположенная в потоке с постоянным течением гибкая нить, закрепленная в двух крайних точках, будет всегда направлена по течению, эта задача сводится к равновесию нити на плоскости, как это показано на рис. 1, где A и B — точки закрепления нити. Пусть начало координат будет в вершине кривой, образуемой нитью, а направления осей координат — соответствовать указанным на рисунке.

Равновесие гибкой нерастяжимой нити на плоскости определяется двумя известными в аналитической механике дифференциальными уравнениями

$$X + \frac{d}{ds} \left(T \frac{dx}{ds} \right) = 0$$

и

$$Y + \frac{d}{ds} \left(T \frac{dy}{ds} \right) = 0,$$

где: X и Y — главные векторы внешних сил, действующих на элемент нити по направлениям осей координат, приходящиеся на единицу длины;

T — натяжение нити.

Так как элемент нити ds может рассматриваться как бесконечно малый прямолинейный отрезок, сила X может быть представлена как сопротивление единицы длины этого отрезка.

В принятой системе координат

$$X = -k\rho d \cdot l \cdot v^2 \sin^3 \alpha$$

или, если обозначить

$$k\rho d \cdot l \cdot v^2 = A,$$

то

$$X = -A \sin^3 \alpha,$$

где A — сопротивление единицы длины нити при перпендикулярном ее положении в потоке.

Точно так же Y — подъемная (распорная) сила единицы длины элементарного наклонного отрезка нити может быть выражена уравнением

$$Q = k\rho F v^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha. \quad (2)$$

Следовательно,

$$Y = A \sin^2 \alpha \cos \alpha.$$

Как видно из рис. 1, угол α , будучи углом наклона элементарного отрезка нити к направлению течения, является в то же время углом наклона к оси абсцисс касательной к образуемой нитью кривой. Следовательно, справедливы равенства

$$\frac{dx}{ds} = \cos \alpha \text{ и } \frac{dy}{ds} = \sin \alpha.$$

При подстановке в уравнения равновесия полученных выше значений входящих в них величин, они преобразуются к виду

$$-A \sin^3 \alpha + \frac{d}{ds} (T \cos \alpha) = 0 \quad (I)$$

$$\text{и } A \sin^2 \alpha \cos \alpha + \frac{d}{ds} (T \sin \alpha) = 0. \quad (II)$$

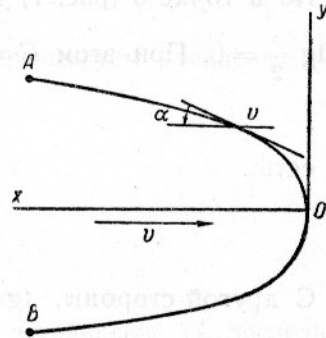


Рис. 1. Схематический вид гибкой нити в потоке.

Если произвести дифференцирование выражений, заключенных в скобках, и привести эти уравнения к общему знаменателю, они примут вид

$$Ads \sin^3 \alpha = dT \cos \alpha - T \sin \alpha d\alpha; \quad (I)$$

$$-Ads \sin^2 \alpha \cos \alpha = dT \sin \alpha + T \cos \alpha d\alpha. \quad (II)$$

При умножении первого уравнения на $\cos \alpha$, а второго на $\sin \alpha$, и последующем почленном их сложении можно получить значение натяжения нити — T .

Действительно

$$\left. \begin{aligned} Ads \sin^2 \alpha \cos \alpha &= dT \cos^2 \alpha - T \cos \alpha \sin \alpha d\alpha \\ -Ads \sin^3 \alpha \cos \alpha &= dT \sin^2 \alpha + T \sin \alpha \cos \alpha d\alpha \end{aligned} \right\} + \quad (I)$$

$$0 = dT,$$

а следовательно,

$$T = \text{const.}$$

Таким образом, натяжение нити, нагруженной силами сопротивления воды в соответствии с принятыми условиями постоянно по всей ее длине. Но в таком случае оно может быть вынесено из-под знака дифференциала и уравнения равновесия преобразуются:

$$\begin{aligned} Ads \sin^3 \alpha &= -T \sin \alpha d\alpha. \\ - Ads \sin^2 \alpha \cos \alpha &= T \cos \alpha d\alpha. \end{aligned}$$

Сокращением тригонометрических величин оба уравнения приводятся к виду

$$Td\alpha = -Ads \sin^2 \alpha.$$

Представив $ds = dy \frac{ds}{dy} = dy \frac{1}{\sin \alpha}$ и введя это значение в последнее уравнение, можно его несколько упростить, а именно:

$$Td\alpha = -A dy \sin \alpha,$$

или, разделив переменные

$$\frac{A}{T} dy = -\frac{d\alpha}{\sin \alpha}. \quad (\text{III})$$

Интегрирование уравнения III дает

$$\frac{A}{T} y = -\ln \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + C.$$

Но в точке 0 (рис. 1) $y = 0$, а $\alpha = \frac{\pi}{2}$; следовательно, $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = 1$ и $\ln \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = 0$. При этом $C = 0$ и

$$\frac{A}{T} y = -\ln \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}. \quad (\text{IV})$$

то есть

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = e^{-\frac{A}{T} y}.$$

С другой стороны, $\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx}$, что после преобразований дает

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{\operatorname{sh} \frac{A}{T} y}. \quad (\text{V})$$

Интегрируя уравнение (V), имеем

$$x = \frac{T}{A} \operatorname{ch} \frac{A}{T} y + C;$$

если при $x = 0$ и $y = 0$, то $\operatorname{ch} \frac{A}{T} y = 1$ и $C_1 = -\frac{T}{A}$. В этом случае

$$x + \frac{T}{A} = \frac{T}{A} \operatorname{ch} \frac{A}{T} y.$$

$\frac{T}{A}$ — величина постоянная, поэтому, перенося ось y вправо на величину $\frac{T}{A}$, получим искомое уравнение гибкой нити

$$x = \frac{T}{A} \operatorname{ch} \frac{A}{T} y. \quad (\text{3})$$

Уравнение (3) представляет собой цепную линию с параметром, равным отношению натяжения нити к сопротивлению единицы длины ее при перпендикулярном направлении течения положения в потоке $\left(\frac{T}{A}\right)$.

Аналогичное уравнение, но более сложного вида и с несколько иным параметром, было получено А. Ф. Поповым [4] для случая троса, нагруженного силой ветра. Совпадение обоих решений, полученных разными путями при различных исходных данных, подтверждает справедливость конечного результата.

Установив уравнение гибкой нити можно перейти к рассмотрению сопротивления нити в зависимости от величины ее параметра.

Длина дуги (в принятой координатной системе) определится уравнением

$$S = \frac{T}{A} \operatorname{sh} \frac{A}{T} y. \quad (4)$$

Сопротивление элементарного отрезка нити может быть представлено в виде

$$dr = Ads \sin^3 \alpha, \quad (VI)$$

где $A = k\rho d \cdot 1 \cdot v^2$.

Так как

$$\sin^3 \alpha = \frac{dy^3}{ds^3},$$

уравнение VI можно преобразовать

$$dr = A \left(\frac{dy}{ds}\right)^2 dy. \quad (VI')$$

Для определения значения $\left(\frac{dy}{ds}\right)^2$ продифференцируем уравнение (4)

$$ds = \operatorname{ch} \frac{A}{T} y dy$$

и

$$\frac{dy}{ds} = \frac{1}{\operatorname{ch} \frac{A}{T} y}.$$

При подстановке полученного значения $\frac{ds}{dy}$ в уравнение VI, последнее преобразуется

$$dr = \frac{1}{\left(\operatorname{ch} \frac{A}{T} y\right)^2} dy. \quad (VI'')$$

Для получения полного сопротивления нити уравнение VI'' должно быть проинтегрировано в пределах значений игрека от 0 до $\frac{h}{2}$, где h — длина хорды, между точками закрепления, и результат удвоен.

Тогда

$$r = 2A \int_0^{\frac{h}{2}} \frac{dy}{\left(\operatorname{ch} \frac{A}{T} y\right)^2}$$

или, после интегрирования и сокращения

$$r = T \operatorname{th} \frac{A}{T} h. \quad (\text{VII})$$

Но в таком виде формула сопротивления неудобна для практического пользования, ибо величина T фактически неизвестна и сама определяется сопротивлением нити. Сопротивление нити удобнее выражать через линейные ее размеры (например, длину нити и длину стягивающей хорды, как это и принято в специальной литературе).

Для цепной линии, описываемой уравнением (3), справедливо уравнение

$$S = \sqrt{x^2 - a^2},$$

где: $a = \frac{T}{A}$ — параметр;

S — длина дуги одной ветви цепной линии, считая от точки пересечения ее с осью абсцисс.

Следовательно,

$$\frac{T}{A} = \sqrt{x^2 - S^2} = \sqrt{\left(\frac{T}{A} \operatorname{ch} \frac{A}{T} h\right)^2 - S^2},$$

откуда

$$T = \sqrt{T^2 \left(\operatorname{ch} \frac{A}{T} h\right)^2 - A^2 S^2},$$

где AS равно, очевидно, сопротивлению нити, расположенной перпендикулярно течению.

Таким образом,

$$T^2 \left[\operatorname{ch}^2 \frac{A}{T} h - 1 \right] = (AS)^2 = r_{90}^2$$

или

$$T = \frac{r_{90}}{\operatorname{sh} \frac{A}{T} h}.$$

Подставив полученное значение T в уравнение VII, можно получить уравнение

$$r = r_{90} : \operatorname{ch} \frac{A}{T} h. \quad (\text{VII}')$$

Длина дуги цепной линии, как известно, может быть выражена также уравнением $s = a \operatorname{tg} \alpha$.

При сопоставлении этого уравнения с (4) в принятой (повернутой) системе координат получится

$$\operatorname{sh} \frac{A}{T} y = \operatorname{ctg} \alpha \quad \text{или} \quad \operatorname{ch} \frac{A}{T} y = \frac{1}{\sin \alpha}.$$

Если обозначить угол между касательной к нити и направлением течения в точке закрепления через θ , то

$$\operatorname{ch} \frac{A}{T} h = 1 : \sin \theta.$$

и, следовательно,

$$r = r_{90} \sin \theta. \quad (5)$$

Угол θ всегда может быть определен по линейным размерам нити (отношение $\mu = \frac{S}{h}$) с помощью специальных таблиц, например, по табл. 6, помещенной в книге проф. Баранова [1]. В указанной книге приняты обозначения

$$\text{угол} - \alpha, \text{ а } \frac{1}{\mu} = \frac{L}{S}.$$

Натяжение нити, определяемое уравнением

$$T = \frac{r_{90}}{\operatorname{sh} \frac{A}{T} h},$$

также преобразуется к виду

$$T = r_{90} \operatorname{tg} \theta, \quad (6)$$

или

$$T = r : \cos \theta. \quad (7)$$

Здесь рассмотрен случай для нити, закрепленной одним концом (одна ветвь цепной линии); в случае нити, закрепленной двумя концами (см. рис. 1), в знаменатель правой части уравнения следует ввести коэффициент 2.

Анализируя полученные уравнения, необходимо отметить, что уравнение (5) является приближенным, ибо оно учитывает только давление воды на нить, но не учитывает сил трения. Это положение может быть справедливым при определении формы нити, так как последняя определяется, в основном, именно давлением потока; трение воды, будучи зависимым от площади поверхности нити, является функцией ее формы. Но при определении сопротивления трение необходимо учитывать.

Сопротивление наклонного к потоку прямолинейного отрезка нити с учетом сил трения выражается уравнением

$$r_{\beta} = r_{90} [\sin^3 \alpha + 0,032 (1 - \sin^3 \alpha)], \quad (8)$$

где α — угол наклона этого отрезка нити к потоку.

Принимая во внимание уравнение (8), нетрудно привести зависимость (5) к виду

$$r = r_{90} [\sin \theta + 0,032 (1 - \sin \theta)]. \quad (5a)$$

Точно так же преобразуется и уравнение (7)

$$T = r \frac{\operatorname{tg} \theta}{\sin \theta + 0,032 (1 - \sin \theta)}. \quad (7a)$$

На рис. 2 построены графики зависимости сопротивления нити от μ ; по оси абсцисс здесь отложены значения μ , а по оси ординат — величины соответствующих им отношений $\frac{r}{r_{90}}$. Кривая *A* соответствует уравнению (5), кривая *B* — уравнению (5a), кривая *C* — опытная, построенная по данным экспериментов Барийона (5). Как видно, кривые *B* и *C* почти совпадают, чем подтверждается справедливость уравнения (5a), а следовательно, и (6) и (7a). Кривая *A* достаточно близка к опытной кривой *C* лишь в пределах значений μ до $\mu = 2$, которыми и ограничивается область применения уравнений (5) и (7).

Выше был рассмотрен случай равновесия нити, закрепленной за оба конца (см. рис. 1). Но если эту нить разрезать в точке *O* и приложить к свободному концу ее силу, равную по величине и обратную по направлению натяжению в этой точке, то равновесие не нарушится, а следовательно, все ранее полученные уравнения остаются в силе.

Практически это сводится к равновесию нити, один конец которой закреплен, а другой загружен. Загрузка в этом случае будет, как видно, эквивалентна натяжению нити в точке O и величина ее может быть определена уравнениями (6), (7) и (7а) в пределах каждого из них.

Это положение приводит к утверждению, что нить, закрепленная одним концом и загруженная на другом, всегда будет принимать в потоке форму цепной линии. Величина же загрузки будет определять лишь ее параметр.

Если легкая нить в потоке закреплена одним концом, а другой конец ее свободен от нагрузки, то она примет форму прямой, параллельной течению. Если же нить весомая, то, согласно анализу проф. Баранова (9), она примет форму прямой, наклонной к направлению течения.

Подъемная сила нити, помещенной в поток, может быть определена из условий ее равновесия. Если пренебречь весом нити, то остаются

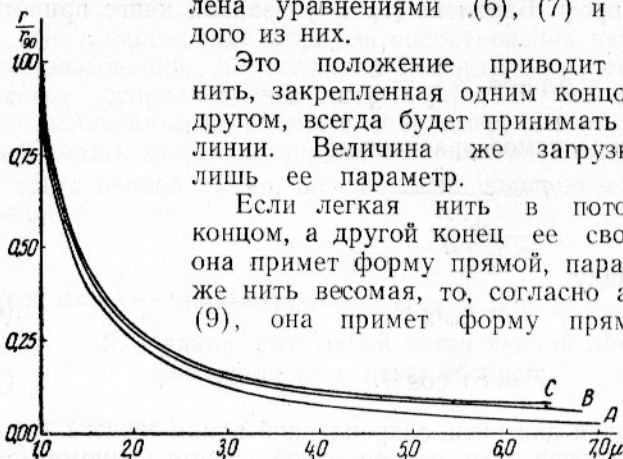


Рис. 2. График зависимости сопротивления гибкой нити от запаса высоты.

три силы, действующие на нее параллельно вертикальной оси, а именно: подъемная сила — q , натяжение в точке $O—T$ и проекция на вертикальную ось натяжения в точке закрепления, равная, очевидно, $T \sin \theta$.

Первая и последняя из них направлены вверх, а средняя — вниз. Таким образом, условие равновесия сводится к уравнению

$$q + T \sin \theta - T = 0,$$

или

$$q = T(1 - \sin \theta), \text{ но } T = r_{90} \operatorname{tg} \theta$$

и, следовательно,

$$q = r_{90} \operatorname{tg} \theta (1 - \sin \theta). \quad (9)$$

Сопротивление гибкой нити в потоке определяется уравнением (5). Но сопротивление сети равно сумме сопротивлений составляющих ее нитей, то есть

$$R = 2nr_{90} [\sin \theta + 0,032(1 - \sin \theta)],$$

где n — количество ячеек по длине сети.

Произведение $2nr_{90} = R_{90}$, то есть сопротивлению сети при положении ее перпендикулярном потоку.

Таким образом, сопротивление сети при наличии у нее некоторого запаса высоты определяется уравнением

$$R_{\mu} = R_{90} [\sin \theta + 0,032(1 - \sin \theta)] = R_{90} (0,968 \sin \theta + 0,032). \quad (10)$$

Это уравнение может быть представлено в виде

$$R_{\mu} = R_{90} f(\mu). \quad (11)$$

$\sin \theta$, входящий в уравнение (10), может быть определен по таблицам элементов цепной линии в зависимости от величины отношения $\mu_n = \frac{S}{h}$ нити. Следовательно, для определения коэффициента $f(\mu)$ сети необходимо установить зависимость между величинами μ и μ_n .

На рис. 3 схематически показана сетная нить расположения в потоке. Стрелками показано направление течения. Нижняя часть нити (ниже плоскости P) отброшена. Точка O_1 соответствует точке O на рис. 1; линия $O_1 N_1$ соответствует оси абсцисс (рис. 1), а $N_1 M$ — параллельна оси ординат того же рисунка. Таким образом, отношение $\frac{S}{h_1}$ соответствует отношению $\frac{S}{h}$ (рис. 1) и равно запасу высоты нити μ_n .

Отрезок прямой, проходящий через точку M , обозначает верхнюю подбурю сети, в точке M которой закреплена ячейка сети, одну из сторон которой образует нить S . Через точку M проведена вертикальная плоскость, параллельная направлению течения. H — след поверхности сети на этой плоскости (величина H равна, очевидно, ширине сети);

h — проекция H на плоскость, перпендикулярную потоку, а значит

$$\frac{H}{h} = \mu.$$

Длина сетной нити

$$S = \frac{H}{\cos \alpha},$$

где $\cos \alpha = \sqrt{1 - u^2}$.

По рис. 3, $h_1 = \frac{h}{\cos \alpha_1}$.

Значит

$$\mu_n = \frac{S}{h_1} = \frac{H}{h} \cdot \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha},$$

или

$$\mu_n = \mu \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha}. \quad (12)$$

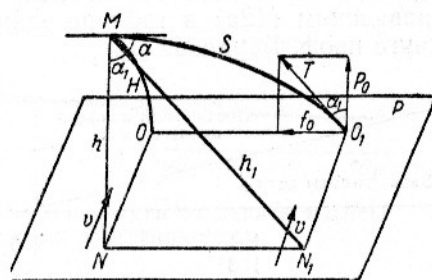


Рис. 3. Положение сетной нити в потоке (схематически).

Чтобы использовать уравнение (12) для определения величины μ_n , необходимо определить предварительно значение $\cos \alpha_1$.

Если сеть развернуть на плоскость, то величина OO_1 определится равенством

$$OO_1 = H \operatorname{tg} \alpha.$$

Но $OO_1 = NN_1$,

а следовательно,

$$NN_1 = H \operatorname{tg} \alpha.$$

С другой стороны

$$NN_1 = h \operatorname{tg} \alpha_1$$

и значит

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{H}{h} \operatorname{tg} \alpha = \mu \operatorname{tg} \alpha,$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1}}, \quad \text{или} \quad \cos \alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}}.$$

Так как

$$\sin \alpha = u,$$

то

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{u^2}{1 - u^2}.$$

Подставив значение $\operatorname{tg}^2 \alpha$ в уравнение $\cos \alpha_1$ и произведя преобразования, можно окончательно выразить значение $\cos \alpha_1$ уравнением

$$\cos \alpha_1 = \frac{\sqrt{1-u^2}}{\sqrt{1+u^2(\mu^2-1)}}.$$

При подстановке значения $\operatorname{tg}^2 \alpha$ в уравнение $\cos \alpha_1$ последнее принимает вид

$$\mu_n = \frac{\mu}{\sqrt{1+u^2(\mu^2-1)}}. \quad (12a)$$

При отыскании величины $\sin \Theta$ по таблице элементов цепной линии следует пользоваться значением μ_n , даваемым уравнением (12a). Как видно из этого уравнения, μ_n зависит не только от запаса высоты сети, но и от посадочного коэффициента.

Поскольку нахождение $\sin \Theta$ связано с трудоемкими вычислениями и предполагает наличие таблицы элементов цепной линии, которая может быть составлена в обозначениях, отличных от принятых в настоящей статье, в табл. 1 даются значения коэффициента $f(\mu)$, подсчитанные по уравнениям (12a) и таблице элементов цепной линии, помещенной в книге проф. Баранова [1].

Таблица 1

Посадочный коэффициент сети u	Запас высоты сети μ						
	0	0,25	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1,1	0,773	0,800	0,832	0,855	0,880	0,915	0,947
1,3	0,530	0,542	0,632	0,682	0,744	0,812	0,892
1,5	0,397	0,435	0,523	0,575	0,660	0,744	0,855
1,7	0,320	0,370	0,457	0,500	0,605	0,712	0,832

Графа табл. 1 с коэффициентом посадки $u=0$ соответствует такому положению сети, при котором нити располагаются параллельно друг другу и боковой кромке так, что $\mu_n = \mu$. При $u=1$ нити располагаются параллельно верхней и нижней кромке сети и $\mu_n = 1$. Понятие боковых и нижних кромок сети здесь условно; вообще следует говорить о кромках сети, перпендикулярных направлению течения (здесь — верхняя и нижняя), и об изогнутых кромках (здесь — боковые). При этом следует помнить, что посадочный коэффициент соответствует в данном случае перпендикулярной течению кромке.

Изложенным выше и объясняется увеличение значений $f(\mu)$ при возрастании посадочного коэффициента, как видно из табл. 1. При увеличении запаса высоты сети падение величины $f(\mu)$ становится более медленным, что связано, очевидно, с увеличением силы трения.

Изменение сопротивления сети в зависимости от ее запаса высоты показано на рис. 4, где по оси абсцисс отложены значения μ , а по оси ординат — отношения $\frac{R_\mu}{R_{00}}$. Кривая A соответствует $u=0$, а кривые B, C и D, $u=0,5$, $u=0,7$ и $u=0,9$ соответственно.

Из рис. 4 видно, что для любых сетей более или менее резкое падение сопротивлений происходит до $\mu=1,5 \div 1,7$, после чего оно значительно замедляется, особенно у сетей с большими посадочными коэффициентами. Таким образом, наиболее выгодным, и с точки зрения сопротивления, будут сети с запасом высоты не более 50—70%. Большие запасы высоты, давая незначительное уменьшение сопротивления, потребуют значительно большего количества материала для изготовления сети, а поэтому их не следует применять. Запасы же высоты более 100% ($\mu > 2$)

вообще не пригодны, так как сопротивление в этом случае остается практически постоянным.

На рис. 3 стрелкой T в точке O_1 обозначено натяжение нити. Если (как это и показано на рис. 3) сеть закреплена только одной кромкой, а вторая кромка ее (OO_1) свободна, то под влиянием составляющей натяжения нити p_0 точка O_1 будет стремиться подняться вверх, а под влиянием составляющей f_0 сдвинуться в сторону точки O .

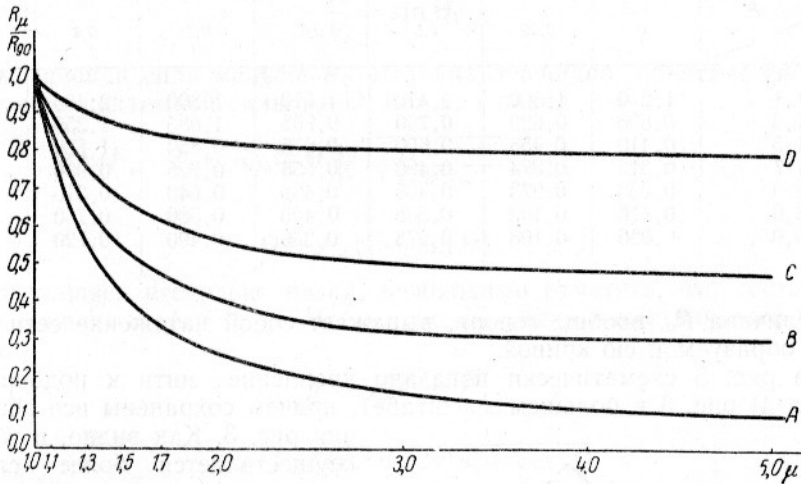


Рис. 4. График зависимости сопротивления сети от запаса высоты ее при различных посадочных коэффициентах.

Поскольку в точке O_1 перекрещиваются две нити (вторая нить на рис. 3 не показана), образующие крайнюю ячейку, силы f_0 будут взаимно уравновешиваться. Для уравновешивания же сил p_0 необходимо приложить к подборе сети силы им равные, но противоположно направленные, то есть загрузить сеть.

Итак, сеть в потоке должна быть загружена, чтобы сохранить заданное ей положение; величина загрузки (вес груза в воде или пловучесть поплавков) определится суммой сил p_0 по подборе сети

$$\Sigma p_o = P_o.$$

Из рис. 3 видно, что

$$p_o = T \cos \alpha_1.$$

Подставив сюда значение

$$\cos \alpha_1 = \frac{\sqrt{1-u^2}}{\sqrt{1+u^2(\mu^2-1)}},$$

можно получить зависимость

$$p_o = T \frac{\sqrt{1-u^2}}{\sqrt{1+u^2(\mu^2-1)}}.$$

Значение T дается уравнением (6) и тогда

$$p_o = r_{90} \operatorname{tg} \Theta \sqrt{\frac{1-u^2}{1+u^2(\mu^2-1)}},$$

$$P_o = \Sigma p_o = \Sigma r_{90} \operatorname{tg} \Theta \sqrt{\frac{1-u^2}{1+u^2(\mu^2-1)}},$$

но

$$\Sigma r_{90} = 2nr_{90} = R_{90},$$

Если заменить правую часть данного уравнения ранее определенными значениями входящих в нее множителей, то оно преобразуется к виду

$$T_o = R_{90} \operatorname{tg} \theta \sin \theta \sqrt{\frac{1-u^2}{1+u^2(\mu^2-1)}}. \quad (14)$$

Отношение топящей силы к загрузке нижней подборки равно

$$\frac{T_o}{P_o} = \sin \theta,$$

то есть топящая сила меньше P_o . Разница, очевидно, объясняется наличием у сети подъемной силы — Q , которая равна

$$Q = P_o - T_o = R_{90} \operatorname{tg} \theta \sqrt{\frac{1-u^2}{1+u^2(\mu^2-1)}} (1 - \sin \theta), \quad (15)$$

или

$$Q = P_o (1 - \sin \theta). \quad (15a)$$

Возвращаясь несколько назад, необходимо отметить, что составляющая натяжения сети в точке M (см. рис. 5) равна геометрической сумме сил t и f

$$p = \sqrt{t^2 + f^2},$$

или

$$p = T \sqrt{\sin^2 \theta \cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \theta}.$$

Натяжение сетного полотна у закрепленной подборки

$$P = \Sigma p = 2nT \sqrt{\sin^2 \theta \cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \theta}. \quad (16a)$$

При замене членов правой части их значениями и некотором преобразовании подкоренного выражения, уравнение (16a) приводится к виду

$$P = R_{90} \operatorname{tg} \theta \sqrt{1 - \sin^2 \theta \frac{u^2 \mu^2}{1 + u^2(\mu^2 - 1)}}. \quad (16)$$

Если аналогичные преобразования под корнем произвести в уравнении (13), то оно примет вид

$$P_o = R_{90} \operatorname{tg} \theta \sqrt{1 - \frac{u^2 \mu^2}{1 + u^2(\mu^2 - 1)}}. \quad (13a)$$

При сравнении уравнения (13a) и (16) видно, что натяжение сетного полотна у подборки больше, чем в середине (или у закрепленной подборки больше, чем у свободной), хотя натяжение сетных нитей и одинаково по всей их длине, как это указывалось ранее. Очевидно, что при расчетах эту разницу необходимо учитывать и натяжение сетного полотна у закрепленной подборки считать по формуле (16); формула же (13a) дает только величину потребной загрузки (или пловучести) незакрепленной подборки.

На рис. 6 графически показана зависимость загрузки P_o от запаса высоты сети. По оси абсцисс здесь отложены значения μ , а по оси координат — отношения $\frac{P_o}{R_{90}}$. При $\mu=1$, как это следует из уравнения (13) и

было отмечено еще раньше, отношение $\frac{P_o}{R_{90}} = \infty$.

Кривая A на рис. 6 соответствует $\mu=0$, то есть показывает зависимость натяжения гибкой нити от ее сопротивления — r_{90} ; кривая B соответствует сети с $u=0,5$; кривая C — сети с $u=0,7$ и кривая D — сети с $u=0,9$.

Из рис. 6 видно, что весьма резкое падение величин P_0 происходит до $\mu=1,4$; далее это падение замедляется и при $\mu > 2,0$ P_0 остается практически постоянным. Поскольку при $\mu < 1,4$ величина P_0 возрастает чрезвычайно быстро, очевидно, при запасе высоты меньше 40% даже малая неточность в размерах орудия может привести к значительным погрешностям в величине потребной загрузки, а следовательно, и нарушить весь режим его работы. Очевидно также, что запасы высоты больше 100% нецелесообразны по соображениям, изложенным ранее при рассмотрении сопротивления сети (см. рис. 4).

Сравнивая кривые B , C и D , нетрудно заметить, что в диапазоне посадок от $u=0,5$ до $u=0,9$, особенно при малых запасах высоты, влияние посадочных коэффициентов на загрузку невелико. Поскольку в практике наиболее употребительны именно вышеуказанные посадочные коэффициенты, формула (13) может быть несколько упрощена для практического использования.

Приняв за среднее значение величину $u=0,707$ (квадратная посадка), которая, очевидно, будет при-

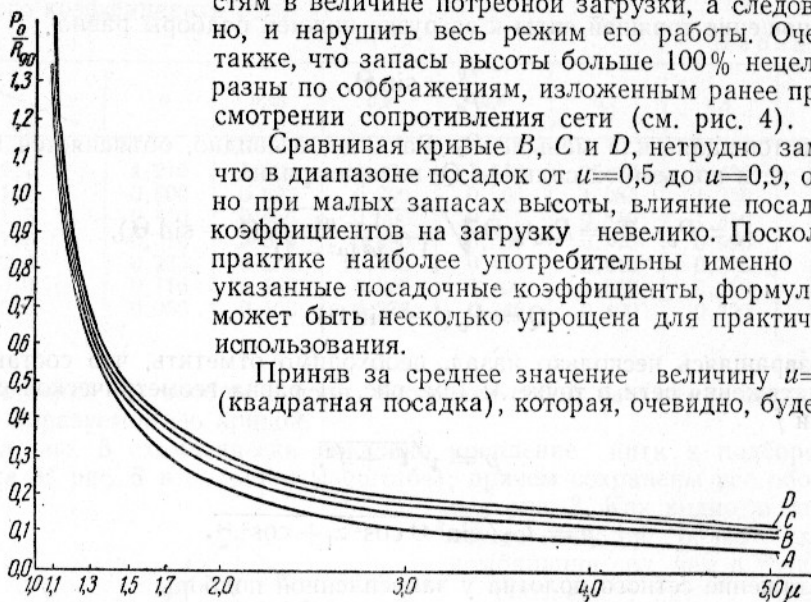


Рис. 6. График зависимости величины загрузки нижней подборы сети от запаса высоты ее при различных посадочных коэффициентах.

мерно отвечать кривой C на рис. 6, подкоренное выражение формулы (13) можно преобразовать

$$\sqrt{\frac{1-u^2}{1+u^2(\mu^2-1)}} = \sqrt{\frac{1-0,5}{1+0,5(\mu^2-1)}} = \sqrt{\frac{0,5}{0,5+0,5\mu^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}},$$

вследствие чего и сама формула (13) примет вид

$$P_0 = R_{90} \operatorname{tg} \theta \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}}. \quad (17)$$

Значение $\operatorname{tg} \theta$ следует выбирать в табл. 2 в столбце, отвечающем $u=0,7$.

В заключение необходимо определить условия свободной фильтрации воды сквозь неплоскую сеть, определяемые неравенством (1).

В данном случае F_{br} равна проекции площади сети на плоскость, перпендикулярную течению, то есть

$$F_{br} = Lh = L \frac{H}{\mu} = \frac{F}{\mu}.$$

F_{net} равна сумме проекций площадей нитей на ту же плоскость, то есть

$$F_{net} = h_1 d 2n = 2n \frac{sd}{\rho_n} = F \frac{d}{\rho_n u \sqrt{1-u^2 \rho_n}}.$$

Отношение

$$\frac{F_{net}}{F_{br}} = \frac{\frac{d}{a}}{u\sqrt{1-u^2}} \frac{\mu}{\mu_n}$$

Но

$$\mu_n = \frac{\mu}{\sqrt{1+u^2(\mu^2-1)}}$$

а следовательно,

$$\frac{F_{net}}{F_{br}} = \frac{d}{a} \cdot \frac{\sqrt{1+u^2(\mu^2-1)}}{u\sqrt{1-u^2}}$$

Так как

$$\frac{F_{net}}{F_{br}} < 0,5,$$

то и

(18)

$$\frac{d}{a} \cdot \frac{\sqrt{1+u^2(\mu^2-1)}}{u\sqrt{1-u^2}} < 0,5,$$

откуда

$$\mu < \frac{\sqrt{(1-u^2)\left(0,25\frac{d^2}{a^2}-u^2\right)}}{u\frac{d}{a}} \quad (20)$$

Неравенство (20) определяет максимальные значения запасов высоты, до которых справедливы полученные выше уравнения. При $\mu=1$ (плоская сеть) неравенство (20) приводится к виду

$$\frac{d}{a} < 0,5 u \sqrt{1-u^2},$$

что вполне соответствует условиям свободной фильтрации для случая плоской сети.

Очевидно, что при $\frac{d}{a} = \text{const}$ максимальный допустимый запас высоты будет тем меньше, чем больше значение u . Практически, как это упоминалось ранее, наибольшим значением $\frac{d}{a}$ можно считать $\frac{d}{a} = 0,1$.

В то же время выше было указано на нецелесообразность практического применения запасов высоты более 2. При этих условиях

$$2 < \frac{\sqrt{(1-u^2)(0,25u^2-0,01)}}{0,1u}, \text{ или } u < 0,935.$$

В практике рыболовства не применяются посадочные коэффициенты больше 0,9, а следовательно, предлагаемые формулы должны быть пригодны для расчетов во всех практических случаях работы рыболовных сетей.

Но при изложении предлагаемого метода расчета, а следовательно, и при выводе расчетных формул для упрощения рассмотрения вопроса были опущены некоторые второстепенные факторы, могущие влиять на сопротивление сетей.

В частности, при суммировании сопротивлений сетных нитей последние считались как бы свободными в потоке и друг с другом не связанными. Фактически сетные нити связаны между собой в узлах сети, и эти связи должны как-то влиять на условия их равновесия, а следовательно, и на форму, ими принимаемую, и их сопротивление.

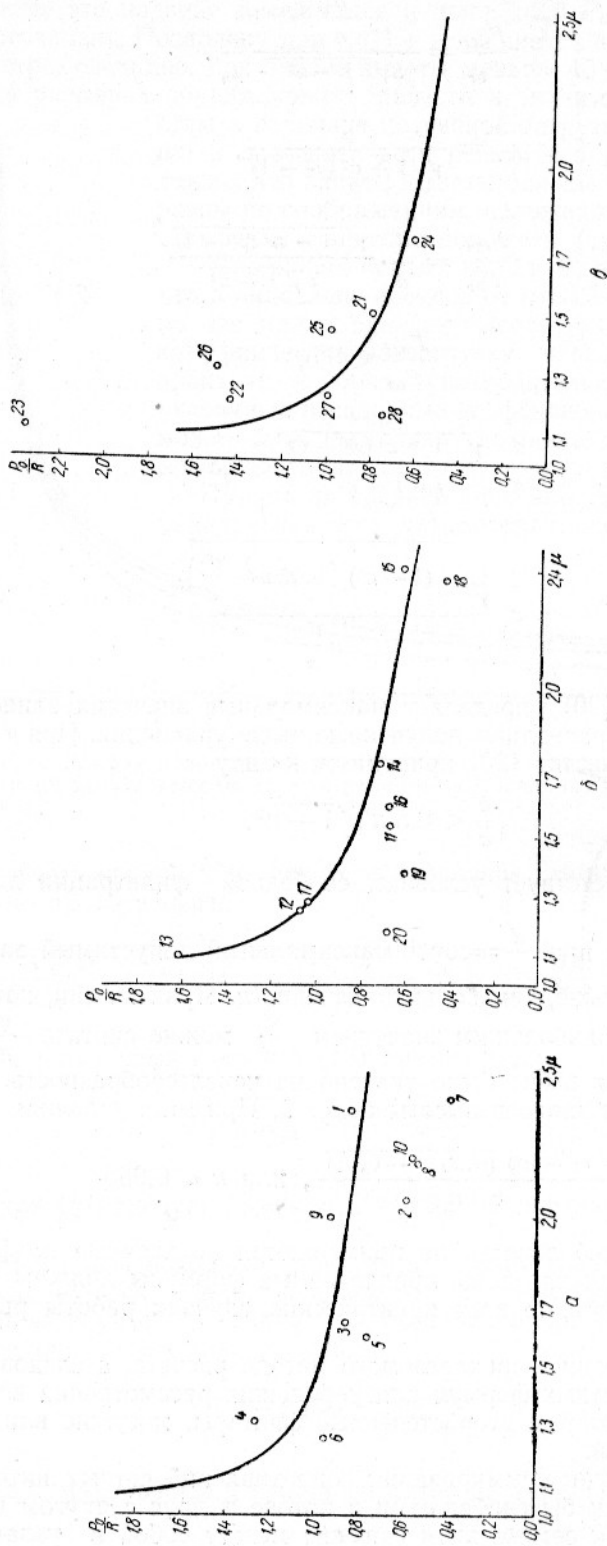


Рис. 7. График зависимости отношения $\frac{P_0}{P}$ ссти от зауса высоты:
 а—при $\alpha=0,35$; б—при $\alpha=0,5$; в—при $\alpha=0,62$.

С другой стороны, сетная нить, а особенно хлопчатобумажная, растяжима, и на ее форму, а значит и сопротивление, должно влиять удлинение нитки под влиянием натяжения.

Кроме того, сетные нити обладают некоторой жесткостью (особенно, осмоленные) и весом, которые также не учитывались при анализе равновесия нити в потоке.

Чтобы учесть возможные влияния всех этих допущений на конечные уравнения, вышеизложенные выводы были подвергнуты экспериментальной проверке.

Критерием для проверки было принято отношение загрузки сети к ее сопротивлению, выражаемое, на основании формул (10) и (13а), уравнением

$$\frac{P_0}{R} = \frac{\operatorname{tg} \theta}{0,968 \sin \theta + 0,032} \sqrt{1 - \frac{u^2 \mu^2}{1 + u^2 (\mu^2 - i)}}. \quad (21)$$

Измерения сопротивлений производились в естественных условиях (в Керченском проливе), чем и объясняется выбор конечного уравнения (21), удобство которого заключается в том, что в него непосредственно не входит скорость течения, измерение которой в естественных условиях с необходимой для поставленной цели точностью является весьма трудной задачей.

Для измерения сопротивлений были построены образцы сетей из различного материала, с различными размерами ячеек и разными посадочными коэффициентами. Длина всех образцов была одинакова (9 м), ширина колебалась от 3,3 до 3,6 м.

Каждое измерение сопротивления сети производилось три раза, и в том случае, если средняя величина из трех измерений отличалась от крайних значений не более чем на 5%, она считалась удовлетворительной.

Глубина погружений нижней подборы сети измерялась с помощью масштабной рейки, причем достаточной считалась, как и в предыдущем случае, такая глубина, которая, будучи средней из трех измерений, отличалась от крайних величин не более чем на 5%.

Запас высоты сети (то есть глубина погружения нижней подборы) регулировался загрузкой нижней подборы и естественной сменой скоростей течения.

В соответствии с уравнением (21) были построены графики зависимости отношений $\frac{P_0}{R}$ от μ для значений посадочных коэффициентов $u=0,25$; $u=0,5$; $u=0,62$ (рис. 7, а—в). На поля графиков были также нанесены величины $\frac{P_0}{R}$, полученные в результате измерений для сетей с теми же посадочными коэффициентами.

Как видно, совпадение опытных точек с аналитическими кривыми на всех графиках (особенно на графике с $u=0,5$) вполне удовлетворительно.

Это совпадение опыта с аналитическими выводами, несмотря на то, что измерения производились в естественных и далеко не благоприятных условиях (при волнении до 3 баллов), служит хорошим подтверждением справедливости предлагаемого метода расчета.

ВЫВОДЫ

1. Рыболовная сеть, помещенная в поток жидкости, принимает под действием гидродинамической нагрузки форму некоторой цилиндрической поверхности. Сетные нити при этом располагаются в плоскости потока, образуя цепные линии с параметром, определяемым отношением натяжения нити к ее сопротивлению.

2. Если существует условие свободной фильтрации воды сквозь сетное полотно, то сопротивление рыболовной сети можно рассчитать путем суммирования сопротивлений составляющих ее гибких нитей.

3. Для определения сопротивления гибкой нити в потоке жидкости получена формула

$$r = r_{90} (0,968 \sin \Theta + 0,032),$$

где: r_{90} — сопротивление той же нити, вытянутой перпендикулярно потоку;

Θ — угол между направлением течения и гибкой нитью в точках ее закрепления.

4. Сопротивление сети определяется уравнением

$$R = R_{90} (0,968 \sin \Theta + 0,032),$$

где все обозначения аналогичны предыдущим. Значения $\text{tg } \Theta$ для некоторых (в том числе наиболее употребительных) коэффициентов посадки и запасов высоты сети приведены в табл. 2.

5. Для определения величины загрузки (или пловучести) сети с одной закрепленной подборой дается формула

$$P_o = R_{90} \text{tg } \Theta \sqrt{1 - \frac{u^2 \mu^2}{1 + u^2 (\mu^2 - 1)}},$$

где: u — посадочный коэффициент по кромке сети, перпендикулярной течению;

μ — запас высоты.

6. Получены также уравнения:

а) для определения натяжения сетного полотна у закрепленной подборы

$$P = R_{90} \text{tg } \Theta \sqrt{1 - \sin \Theta \frac{u^2 \mu^2}{1 + u^2 (\mu^2 - 1)}};$$

б) для определения силы, затопляющей верхнюю (или поднимающей нижнюю) закрепленную подбору

$$T_o = R_{90} \text{tg } \Theta \sin \Theta \sqrt{1 - \frac{u^2 \mu^2}{1 + u^2 (\mu^2 - 1)}};$$

в) для определения подъемной силы сети

$$Q = R_{90} \text{tg } \Theta (1 - \sin \Theta) \sqrt{1 - \frac{1 - u^2 \mu^2}{1 + u^2 (\mu^2 - 1)}}.$$

7. Условие свободной фильтрации воды сквозь сетное полотно определяется неравенством

$$\mu \leq \frac{\sqrt{(1 - u^2) \left[0,25 u^2 - \left(\frac{d}{a} \right)^2 \right]}}{u \frac{d}{a}}.$$

Это условие справедливо почти во всех случаях практической работы рыболовных сетей, одна подбора которых закреплена, а другая загружена, то есть при $\frac{d}{a} \leq 0,10$, $u \leq 0,90$, $\mu \leq 2,00$.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Ф. И., Теория и расчет орудий рыболовства, Пищепромиздат, 1942.
2. Баранов Ф. И., Форма и натяжение ваера при тралировании, «Рыбное хозяйство», № 6, 1947.
3. Жуковский Н. Е., Теоретические основы воздухоплавания, ч. 1, ОНТИ, 1938.
4. Попов, А. Ф., Аналитическое решение задачи: по данному весу шара, заполненного водородом, и по данной длине и весу шнура, к которому привязан этот шар, определить высоту шара в воздухе и скорость ветра с помощью измерения одного угла и двух уравновешений в нижнем конце шнура. Записки Императорской Академии Наук, т. XI, кн. 1, 1857.
5. Рынин Н. А., Давление ветра на пластинки, решетки и мостовые фермы, Труды ЛИИПС, вып. 89, 1915.
6. Barillon M. Expériences de remorquage de fils et filets, Revue de travaux de l'office des pêches maritimes, т. VI. F. 2, 1933.