

УДК 639.2.065

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ СУДНА С РЫБОЛОВНЫМ ТРАЛОМ

А. И. Карапузов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РЫБОЛОВНОГО ТРАЛА ОТНОСИТЕЛЬНО СУДНА ПРИ КРИВОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ

Общие положения о маневрировании промысловых судов

При ведении тралового промысла от судна с буксируемым тралом требуется выполнение сложных маневров, связанных с расхождением при встрече с другими судами, удерживанием судна на промысловых глубинах, прицельным тралением и т. д. Для успешного проведения этих маневров необходимо знание основных элементов движения системы судно-трал. Практика тралового промысла показывает, что при управлении судном судоводителями нередко допускаются грубые ошибки, которые приводят к авариям тралов. Причины этих ошибок заключаются в незнании маневренных качеств системы судно-трал, в неумении определить положение и траекторию движения трала при выполнении маневров. Из-за отсутствия необходимого научного обоснования вопросов маневрирования промыслового судна с буксируемым тралом судоводители-промысловики до сих пор не имеют достаточных практических рекомендаций по маневрированию. Поэтому многие из них в своих действиях при выполнении маневров вынуждены полагаться на интуицию, глазомер и свой опыт, а если опыт недостаточен, то маневры проводятся наугад, без всякого обоснования.

Значительное количество аварий, вызванных сцеплением тралов, настоятельно требует решения задачи о расхождении судов при совместном промысле. Эти аварии стали происходить сравнительно недавно в связи с эксплуатацией больших групп судов в одном районе промысла, где обнаруживается промысловая концентрация рыбы. Для обеспечения безопасности расхождение судов при совместном промысле регулируется «Правилами предупреждения столкновения судов в море» (ППСС, 1948 г.) и «Наставлением по маневрированию судов при работе с тралами» (1958 г.). Однако наличие правил, регламентирующих расхождение, не исключает случаев столкновения судов и более частых случаев сцепления тралов. Дело в том, что правила, которыми прихо-

дится руководствоваться судоводителям, далеко не совершенны, так как не содержат достаточных практических рекомендаций и не могут полностью удовлетворять потребностям промысловой практики.

Для подтверждения этого целесообразно рассмотреть основные положения ППСС, касающиеся рыболовных судов, и положения раздела В «Правил для управления судами» и дать некоторые замечания к этим положениям.

Правила рассматривают суда, занятые рыбным промыслом, односторонне — только с точки зрения более стесненного маневрирования по сравнению с другими судами. Соответственно с этим для рыболовных судов установлены отличительные сигналы, а также предусмотрено, что «все суда на ходу, не занятые рыбной ловлей, должны уступать дорогу всем судам, занятым ловлей рыбы сетями, крючковыми снастями или тралами». Вопросы же расхождения в море промысловых судов в ППСС не затрагиваются вовсе. Распространение общих правил для судов с механическим двигателем на ходу на суда, ведущие совместный промысел, не всегда достигает своей цели, поскольку эти правила применимы лишь при одинаковом маневренном состоянии судов. В действительности даже в том случае, если суда работают однотипными орудиями лова (например, тралами), они на разных стадиях своей производственной деятельности имеют различную маневренность. Так, в процессе ведения тралового промысла судно может находиться на ходу с поднятыми на борт орудиями лова или быть занято буксировкой, спуском и подъемом трала, а также лежать в дрейфе с частично выпущенными за борт орудиями лова.

Кроме того, возникают особые случаи при задеве, когда трал зацепился за неровность морского дна, при сцеплении тралов между собой, а также при наматывании орудия лова на гребной винт.

ППСС составлены для случая встречи одновременно только двух судов. При совместном промысле расходиться приходится нескольким судам одновременно, что значительно усложняет процесс расхождения.

Правила имеют силу в тех случаях, когда возникает опасность столкновения судов. В практике при расхождении судов необходимо предусматривать не только опасность столкновения, но и опасность сцепления тралов. Поэтому встречаются случаи, когда возникает необходимость отступления от правил во избежание сцепления тралов, что противоречит их основному назначению — обеспечению безопасности.

Приведенные замечания свидетельствуют о том, что правила оставляют на решение судоводителей промысловых судов слишком много вопросов, по которым должны быть даны вполне определенные и четкие указания. К сожалению, не вносит ясности и определенности в эти вопросы и действующее «Наставление по маневрированию судов при работе с тралом», так как оно основывается на действующих ППСС. В разделе III «Наставления» указываются минимальные расстояния при расхождении и обгоне промысловых судов, но, как и в ППСС не производится никакой градации судов по маневренным возможностям и отсутствуют конкретные указания о положении трала при маневре и с какого расстояния следует начинать маневрирование на расхождение.

Практика промысла также до сих пор не выработала безопасного расстояния для начала маневров при расхождении, так как оно неодинаково для различных судов и при разных обстоятельствах.

Отсутствие надлежащей научной разработки вопросов маневрирования судна с тралом замедляет решение практических задач, направленных на ликвидацию аварийности, улучшение уловистости тралов и совершенствование правил плавания. В связи с этим исследование кри-

волинейного движения системы судно-трал, которое осуществляется в процессе маневрирования, является одной из важнейших задач в области техники современного тралового промысла.

В настоящей работе выполнено теоретическое и экспериментальное исследование этой задачи для предупреждения аварий тралов, возникающих вследствие неправильного маневрирования. Некоторые закономерности криволинейного движения судна с тралом, полученные в результате этих исследований, помогут определить элементы маневра расхождения промысловых судов для предупреждения сцепления буксируемых тралов и установить режим криволинейного движения для уменьшения повреждаемости трала о грунт и предупреждения его заверта.

Кроме того, теоретическая разработка вопросов маневрирования промыслового судна с буксируемым тралом поможет промысловикам решать задачи, связанные с удерживанием судна на промысловых глубинах и осуществлением прицельного траления.

Маневренные элементы свободного судна достаточно широко изучены и способы их определения излагаются в теории корабля и навигации.

Криволинейное движение судна без трала определяется траекторией движения центра тяжести, которая носит название циркуляции. Различают три периода циркуляции. Первый период — маневренный — по времени совпадает с продолжительностью перекладки руля. Второй период — эволюционный — начинается с момента окончания перекладки руля и заканчивается, когда элементы движения примут установившийся характер. Третий период — установившийся — начинается с момента окончания второго периода. Траектория движения центра тяжести в первых двух периодах циркуляции представляет кривую переменной кривизны, в установившемся периоде — окружность. Движение судна по криволинейной траектории в первых двух периодах характеризуется (рис. 1): углом дрейфа β_0 , т. е. углом между диаметральной

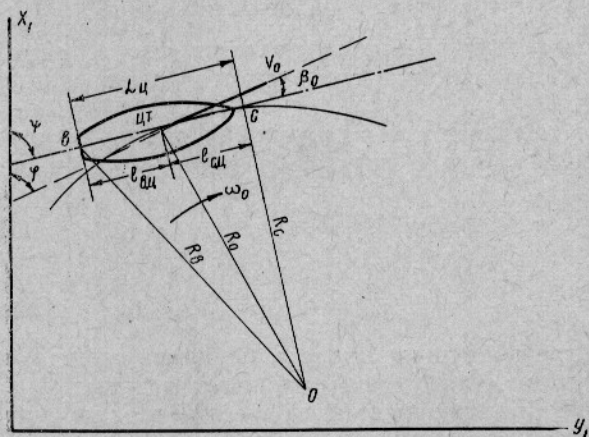


Рис. 1. Схема криволинейного движения судна без трала.

плоскостью судна и мгновенным направлением линейной скорости центра тяжести; линейной скоростью центра тяжести судна v_0 ; угловой скоростью вращения судна ω ; углом курса ψ , т. е. углом между диаметральной плоскостью судна и неподвижной осью x_1 ; углом скорости φ , т. е. углом между осью x_1 и направлением линейной скорости; координатами центра тяжести судна x_1 и y_1 .

натами центра тяжести судна $x'_1; y'_1$; радиусом кривизны траектории центра тяжести судна R_0 .

Кинематическая связь между указанными величинами устанавливается следующими зависимостями:

$$\omega = \frac{d\psi}{dt} = \frac{v_0}{R_0} + \frac{d\beta_0}{dt}, \quad (1)$$

$$\varphi = \psi - \beta_0, \quad (2)$$

$$\frac{dx'_1}{dt} = v_0 \cos \varphi; \quad \frac{dy'_1}{dt} = v_0 \sin \varphi. \quad (3)$$

Угловая скорость всех точек судна при установившемся движении одинакова и постоянна по времени, а линейная скорость зависит от расстояния между данной точкой и центром тяжести.

На диаметральной плоскости судна (или на ее продолжении) находится точка, в которой угол дрейфа $\beta = 0$. Положение этой точки, носящей название центра вращения, характеризуется значением $l_{\text{cv}} = -\bar{R}_0 \beta_0$. Геометрически положение центра вращения определяется пересечением диаметральной плоскости судна с перпендикуляром, опущенным на диаметральной плоскости из центра циркуляции. Относительное отстояние центра вращения от центра тяжести судна выражается формулой

$$\frac{l_{\text{cv}}}{L_c} = \bar{R}_0 \beta_0, \quad (4)$$

где L_c — длина судна;

l_{cv} — расстояние между центром тяжести и центром вращения судна.

Для ориентировочного определения l_{cv} принимают $\bar{R}_0 \beta_0 = 0,45$, т. е. $l_{\text{cv}} = 0,45 L_c$ [4]; тогда отстояние точки подвеса ваеров от центра вращения судна найдется из выражения

$$L_{\text{ц}} = l_{\text{вц}} + l_{\text{cv}} = l_{\text{вц}} + 0,45 L_c, \quad (5)$$

где $L_{\text{ц}}$ — отстояние центра вращения судна от точки подвеса ваеров;

$l_{\text{вц}}$ — расстояние между точкой подвеса ваеров и центром тяжести судна.

Тогда угол дрейфа, радиус циркуляции и линейная скорость в точке подвеса ваеров на судне могут быть выражены при помощи формул

$$\beta_{\text{в}} = \arctg \frac{L_{\text{ц}}}{R_c} \approx \frac{L_{\text{ц}}}{R_c}, \quad (6)$$

$$R_{\text{в}} = \frac{R_c}{\cos \beta_{\text{в}}}; \quad v_{\text{в}} = v_c \frac{R_{\text{в}}}{R_c}, \quad (7, 8)$$

где $\beta_{\text{в}}$ — угол дрейфа в точке подвеса ваеров на судне;

R_c — радиус циркуляции центра вращения судна;

$R_{\text{в}}$ — радиус циркуляции точки подвеса ваеров на судне;

$v_{\text{в}}$ — линейная скорость точки подвеса ваеров на судне.

Точку подвеса ваеров на судне будем считать в дальнейшем характерной точкой, траектория которой будет определять движение судна в системе судно-трал.

Маневренные элементы промыслового судна с буксируемым тралом характеризуются геометрическими параметрами и режимом движения. Геометрические параметры определяются по поперечным и продольным габаритным размерам системы судно-трал. При прямолинейном движе-

нии одиночного судна с буксируемым тралом ширина полосы движения, занимаемая ими, находится по расстоянию между распорными траловыми досками.

Продольные габаритные размеры найдутся суммированием длины судна, горизонтальной проекции длины ваера, проекции кабеля на ось симметрии трала и длины самого трала:

$$L_{\Sigma} = L_c + \sqrt{L^2 - h^2} + l_k + l_T, \quad (9)$$

где L_{Σ} — продольный габаритный размер системы судно-трал;

L_c — длина судна;

L — длина ваера;

h — глубина траления;

l_k — проекция кабеля на ось симметрии трала;

l_T — длина трала.

Для предупреждения сцепления тралов при маневрировании одной из главных задач является определение положения трала относительно судна, так как от этого зависит целесообразность движения судна по заданному пути.

Определение положения трала при прямолинейном движении системы судно-трал не представляет трудности и может быть выполнено по формуле (9). Приближенные способы также даны в работах [3] и [9].

Определение положения трала при криволинейном движении системы судно-трал представляет собой весьма сложную задачу, поскольку буксируемый трал неуправляем и поведение его зависит от движения судна. Задача усложняется также тем, что общая теория движения трала в воде мало разработана и совершенно отсутствуют какие-либо конкретные данные о поведении трала при криволинейном движении судна (на поворотах).

Для упрощения математической постановки этой задачи заменим движение судна и трала движением их характерных точек. Характерной точкой судна считаем точку подвеса ваеров, характерной точкой трала — середину расстояния между траловыми досками. Замена движения трала движением характерной точки дала возможность исключить из рассмотрения некоторые осложняющие обстоятельства, не влияющие на принципиальное решение задачи.

Криволинейное движение судна с буксируемым тралом определяется траекториями их характерных точек.

Таким образом, анализ маневрирования системы судно-трал сводится к анализу траектории или, точнее, к определению степени несовпадения траектории трала с основной траекторией судна. В конечном итоге сопоставление формы и параметров траекторий судна и трала при различных режимах поворота позволяет выбрать необходимый режим движения для предупреждения сцепления и заверта трала.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ БУКСИРУЕМОГО ТРАЛА ПРИ ПОВОРОТЕ ПРОМЫСЛОВОГО СУДНА

Для схематизации явления поворота судна с буксируемым тралом примем ряд упрощающих допущений.

Движение судна с буксируемым тралом будем считать установившимся. Движение буксируемого трала примем как плоское движение жесткой фигуры, которое определяется движением характерной точки. Длину ваеров заменим длиной условной нити, которая соединяет характерные точки судна и трала и совпадает с осью симметрии ваеров. Го-

горизонтальную проекцию условной нити l принято считать базой буксировки.

Для нахождения траектории аналитическим путем необходимо по данной кривой (траектории движения судна)

$$y = f(\varepsilon) \quad (10)$$

найти другую кривую (траекторию движения трала)

$$y = f_1(x) \quad (11)$$

при условии, что длина касательной (база буксировки) к искомой кривой до точки пересечения с заданной кривой — есть величина постоян-

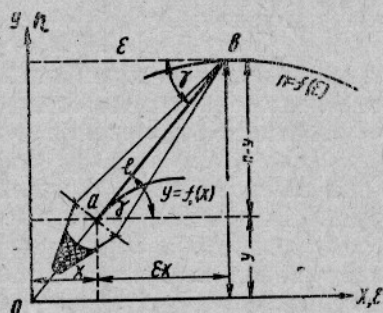


Рис. 2. Схема для аналитического определения положения трала.

ная. Учитывая обозначения схемы (рис. 2), зависимость между координатами обеих кривых выражается уравнениями

$$y = \eta - l \sin \gamma, \quad (12)$$

$$x = \varepsilon - l \cos \gamma. \quad (13)$$

Но так как

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{dy}{dx} = y', \quad (14)$$

то

$$\sin \gamma = \frac{y'}{\sqrt{1+(y')^2}}, \quad (15)$$

$$\cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{1+(y')^2}} \quad (16)$$

Подставляя значения (15) и (16) в уравнения (12) и (13), найдем

$$y = \eta - l \frac{y'}{\sqrt{1+(y')^2}}, \quad (17)$$

$$x = \varepsilon - l \frac{1}{\sqrt{1+(y')^2}}. \quad (18)$$

Подставляя в уравнение (17) зависимость (10), получим два уравнения

$$y = f(\varepsilon) - l \frac{y'}{\sqrt{1+(y')^2}}, \quad (19)$$

$$x = \varepsilon - l \frac{1}{\sqrt{1 + (y')^2}}. \quad (20)$$

Исключая из них ε , получим дифференциальное уравнение; решив которое, найдем искомую кривую

$$y = f_1(x),$$

характеризующую собой траекторию точки a (трала).

Форма траектории движения судна при повороте зависит от многих причин: скорости судна, боковой составляющей натяжения ваера в точке подвеса, силы ветра, парусности судна, наличия течения и других факторов, прямо или косвенно влияющих на поворот. Определение такой траектории аналитическим методом — довольно сложная задача.

В практике тралового промысла различают быстрый и медленный поворот судна с буксируемым тралом. Если при быстром повороте судна считать, что трал остается на месте и не имеет смещения к центру поворота судна, то можно принять, что такой поворот судна происходит мгновенно. После поворота судно движется прямолинейно, если пренебречь его смещением от перечисленных выше факторов, а трал описывает промежуточную траекторию, форма которой определяется следующим образом.

Для расположения координат, принятых на рис. 2, уравнение прямой, по которой движется точка подвеса ваеров b , будет $\eta=0$, так как точка b движется по оси x .

Тогда

$$y = \eta - l \frac{y'}{\sqrt{1 + (y')^2}} = -l \frac{y'}{\sqrt{1 + (y')^2}},$$

откуда

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y}{\sqrt{l^2 - y^2}},$$

$$x = \int \frac{\sqrt{l^2 - y^2}}{y} dy.$$

Интегрируя, получим

$$x = \sqrt{l^2 - y^2} - l \ln \frac{l + \sqrt{l^2 - y^2}}{y} + C. \quad (21)$$

Полученное уравнение кривой (траектория движения трала) представляет собой уравнение трактрисы — линии влечения.

Если начало координат установить так, что при $x=0$ $y=l$, то постоянная интегрирования в уравнении (21) равна нулю. Тогда уравнение (21) перепишем в следующем виде:

$$x = \sqrt{l^2 - y^2} - l \ln \frac{l + \sqrt{l^2 - y^2}}{y}. \quad (22)$$

Рассчитав базу буксировки l и задаваясь значениями y (ординаты y_1, y_2, y_3), можно найти по уравнению (22) абсциссы (x_1, x_2, x_3 и т. д.) и построить траекторию движения трала. Уравнение (22) показывает, что при $y=0$ $x \rightarrow \infty$, т. е. траектория точки a приближается к траектории точки b , как к асимптоте. Скорость этого приближения практически будет зависеть от величины базы буксировки l .

Для осуществления медленного поворота судна с буксируемым тра- лом необходимо, чтобы радиус циркуляции судна был больше базы бук- сировки. Рассмотрим этот случай поворота при допущении, что траек- тория судна — окружность. Если примем для простоты, что центр ок- ружности совпадает с началом координат, то, учитывая обозначения, принятые на рис. 2, получим

$$\varepsilon^2 + \eta^2 = R^2. \quad (23)$$

Подставляя в уравнение (23) выражения для ε и η , после ряда преобразований получим

$$\begin{aligned} [(y^2 + x^2 - R^2 + l^2)^2 - 4l^2 y^2] \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 - 8l^2 yx \frac{dy}{dx} + \\ + [(y^2 + x^2 - R^2 + l^2)^2 - 4l^2 x^2] = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Для удобства решения полученного дифференциального уравнения перейдем к полярным координатам (рис. 3):

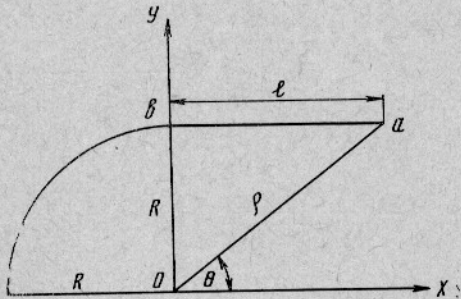


Рис. 3. Схема определения радиуса асимптотической окружности.

$$\begin{aligned} x &= \rho \cos \Theta, & y &= \rho \sin \Theta, \\ dx &= -\rho \sin \Theta d\Theta + \cos \Theta d\rho, \\ dy &= \rho \cos \Theta d\Theta + \sin \Theta d\rho, \\ x^2 + y^2 &= \rho^2, \end{aligned}$$

тогда

$$\frac{d\Theta}{d\rho} = \frac{\sqrt{\rho^4 + 2\rho^2(R^2 + l^2) - (R^2 - l^2)}}{\rho[\rho^2 - (R^2 - l^2)]}. \quad (25)$$

Обозначая для удобства

$$R^2 - l^2 = a, \quad R^2 + l^2 = b,$$

получим

$$\frac{d\Theta}{d\rho} = \frac{\sqrt{-a^2 + 2b\rho^2 - \rho^4}}{\rho(\rho^2 - a)},$$

следовательно,

$$\Theta = \int \frac{\sqrt{-a^2 + 2b\rho^2 - \rho^4}}{\rho(\rho^2 - a)} d\rho.$$

Интегрируя, получаем

$$\Theta = \frac{1}{2} \arcsin \left\{ \frac{(R^2 - l^2) + \rho^2}{2R^2 \rho^2} \sqrt{4l^2 \rho^2 - [\rho^2 - (R^2 - l^2)]^2} \right\} - \frac{l}{\sqrt{R^2 - l^2}} \ln \left\{ \frac{4l^2 (R^2 - l^2)}{\rho^2 - (R^2 - l^2)} + 2l^2 + \frac{2l \sqrt{R^2 - l^2}}{\rho^2 - (R^2 - l^2)} \sqrt{4l^2 \rho^2 - [\rho^2 - (R^2 - l^2)]^2} \right\} + C. \quad (26)$$

Если за начальное положение траля взять такое, при котором база буксировки перпендикулярна к касательной направляющей кривой, то при

$$\Theta = 0, \quad \rho = R + l$$

$$C = \frac{l}{\sqrt{R^2 - l^2}} 2Rl.$$

Рассматривая уравнение (26), находим, что при

$$\rho = R + l; \quad \Theta = 0;$$

$$\rho^2 = R^2 - l^2; \quad \Theta \rightarrow \infty.$$

Это значит, что точка A , находящаяся в начале движения на расстоянии l от направляющей окружности, при движении точки b по окружности радиуса R будет асимптотически приближаться к некоторой окружности, радиус которой (см. рис. 3).

$$r = \sqrt{R^2 - l^2}. \quad (27)$$

Уравнение (27) показывает, что графически радиус r этой асимптотической окружности может быть определен как катет прямоугольного треугольника, у которого гипотенузой служит радиус направляющей окружности R , а другим катетом — база буксировки l .

Если бы за начальное положение взять

$$\Theta = 0; \quad \rho = R - l,$$

т. е. траля находится внутри направляющей окружности и база буксировки перпендикулярна к ней, то получили бы уравнение другой кривой, которая, находясь внутри направляющей кривой, асимптотически приближается к той же самой асимптотической окружности, радиус которой

$$r = \sqrt{R^2 - l^2}.$$

Таким образом, приходим к заключению, что при движении судна по окружности, независимо от того, как расположен траля в начале движения, траектория его всегда будет приближаться асимптотически к некоторой окружности, радиус которой определяется только радиусом направляющей кривой и длиной базы буксировки.

Полученные в результате аналитического решения выводы о том, что траектория траля приближается асимптотически к некоторому максимуму отклонения от траектории движения судна, могут быть использованы для вывода зависимости угла отклонения базы буксировки от диаметральной плоскости судна и радиуса поворота траля. Знание угла

отклонения ваеров от диаметральной плоскости судна позволяет определить положение трала относительно судна, а радиус поворота трала—судить о характере работы трала при повороте судна.

Рассмотрим схему (рис. 4) движения судна с буксируемым тралом при повороте с учетом принятых ранее допущений. Обозначим угловую

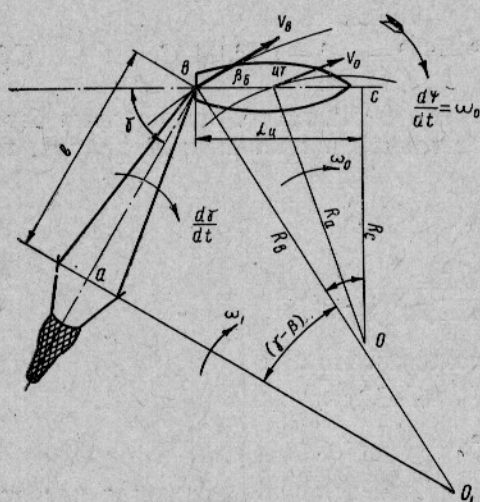


Рис. 4. Схема криволинейного движения судна с тралом.

скорость вращения судна вокруг мгновенного центра O через ω_0 , а угловую скорость вращения трала вокруг мгновенного центра O_1 — ω_1 .

Положение мгновенного центра O_1 определяется на продолжении линии, соединяющей центр O с точкой подвеса ваеров b , т. е. в точке пересечения перпендикуляров, восстановленных к линейным скоростям, характерных точек судна и трала. Очевидно, что линейная скорость v_b точки b равна

$$v_b = \omega_0 \overline{Ob} = \omega_1 \overline{O_1b}.$$

Следовательно, между угловыми скоростями ω_1 и ω_0 имеется такая зависимость

$$\omega_1 = \omega_0 \frac{\overline{Ob}}{\overline{O_1b}}. \quad (28)$$

Угол γ между диаметральной плоскостью судна и базой буксировки, равный нулю в начале поворота, увеличивается при повороте, и относительная угловая скорость $d\gamma/dt$ равна разности абсолютных угловых скоростей судна и трала, т. е.

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_0 - \omega_1. \quad (29)$$

Подставляя значение формулы (28) в уравнение (29), получим

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_0 \left(1 - \frac{\overline{Ob}}{\overline{O_1b}} \right). \quad (30)$$

Из уравнения (30) следует, что если центры O и O_1 совпадут, т. е. если \overline{Ob} будет равно $\overline{O_1b}$, то движение трала к центру поворота прекратится, так как в этом случае $d\gamma/dt=0$. Из уравнения (30) следует, что если $d\gamma/dt=0$, то $\omega_0=\omega_1$, т. е. судно и трал вращаются как одно целое вокруг единого мгновенного центра с одинаковой угловой скоростью. Можно легко доказать, что это предельное положение криволинейного движения судна с тралом достижимо лишь при $t \rightarrow \infty$. Таким образом, при повороте судна буксируемый трал всегда смещается к центру поворота, причем величина этого смещения зависит от радиуса поворота судна и длины вытравленных ваеров.

Учитывая обозначения, принятые на рис. 4, можно написать

$$\overline{O_1b} = \frac{l}{\sin(\gamma - \beta)}, \quad (31)$$

где γ — угол между диаметральной плоскостью судна и базой буксировки;

β — угол дрейфа при повороте судна;

$$\overline{Ob} = \frac{L_{II}}{\sin \beta}. \quad (32)$$

Отношение этих двух радиусов равно

$$\frac{\overline{Ob}}{\overline{O_1b}} = \frac{L_{II} \sin(\gamma - \beta)}{l \sin \beta}. \quad (33)$$

Для небольших углов поворота судна в выражении (33) можно заменить синусы аргументами. Тогда, имея в виду, что

$$\omega_0 = \frac{v_0}{R_0},$$

подстановкой выражения (33) в равенство (30) получим следующее уравнение криволинейного движения судна с буксируемым тралом:

$$\frac{d\gamma}{dt} + \frac{v_0}{l} \gamma = \left(1 + \frac{L_{II}}{l}\right) \omega_0. \quad (34)$$

Полученное дифференциальное уравнение выражает зависимость угла γ от геометрических параметров системы судно-трал и режима ее криволинейного движения.

Для выведения расчетных формул проинтегрируем уравнение (34) в двух интервалах времени.

Первый период — криволинейная траектория судна и трала, если трал не стоит на месте:

$$\text{от } t = 0 \text{ до } t = \tau_1.$$

Второй период — прямолинейное движение судна и криволинейная траектория трала

$$\text{от } t = \tau_1 \text{ до } t \rightarrow \infty$$

Таким образом, интервалы времени будут следующие:

$$(0 \div \tau_1) \text{ и } (\tau_1 \rightarrow \infty),$$

где τ_1 — момент времени, соответствующий окончанию поворота судна и началу движения постоянным курсом.

Если обозначить

$$\frac{v_0}{l} = P; \quad \left(1 + \frac{L_{II}}{l}\right) \omega_0 = Q,$$

то общее решение линейного уравнения первого порядка, каким является выражение (34), примет вид:

$$\gamma = e^{-Pt} \left[\int Q e^{Pt} dt + C_1 \right] \quad (35)$$

Частное решение уравнения (35) в первом периоде получим из следующих начальных условий:

$$t = 0; \quad \gamma = 0.$$

Тогда постоянная интегрирования C_1 найдется из выражения

$$0 = Q + C_1; \quad C_1 = - \left(1 + \frac{L_n}{l} \right) \omega_0. \quad (36)$$

Подставив выражение (36) в уравнение (35), получим искомую функцию $\gamma = f(t)$ в следующем виде:

$$\gamma = \left(\frac{l + L_n}{v_0} \right) \omega_0 \left(1 - e^{-\frac{v}{l} t} \right).$$

Учитывая зависимости для установившегося движения судна с буксируемым тралом, можно написать

$$S = v_0 t,$$

$$\psi = \omega_0 t,$$

где S — путь, пройденный судном в течение первого периода;

ψ — угол поворота судна.

Окончательное выражение для угла γ в первом периоде примет следующий вид:

$$\gamma = \frac{(l + L_n)\psi}{S} \left(1 - e^{-\frac{S}{l}} \right). \quad (37)$$

Во втором периоде, когда судно движется постоянным курсом, — $\omega_1 = 0$. Тогда уравнение (35) можно переписать

$$\frac{d\gamma}{dt} + \frac{v_0}{l} \gamma = 0.$$

После интегрирования получим

$$\int \frac{d\gamma}{\gamma} = - \frac{v_0}{l} \int dt,$$

откуда

$$\ln \gamma = - \frac{v_0}{l} t + \ln C_2.$$

Потенцируя обе части равенства, получим

$$\gamma = C_2 e^{-\frac{v_0}{l} t}.$$

Начальными условиями будут

$$\gamma = \gamma_{\max}; \quad t = 0.$$

Постоянная интегрирования

$$C_2 = \gamma_{\max}.$$

Расчетная формула для второго периода получит следующее выражение:

$$\gamma = \gamma_{\max} e^{-\frac{S}{l}}. \quad (38)$$

Полученные расчетные формулы (37) и (38) позволяют находить положение трала относительно судна в любой момент времени, а также определять время, в течение которого трал движется по криволинейной траектории.

Радиус поворота трала можно определить из следующей зависимости (см. рис. 4):

$$R_b = \sqrt{R_c^2 + L_u^2}$$

$$r = \sqrt{R_b^2 - l^2} = \sqrt{R_c^2 + L_u^2 - l^2} \quad (39)$$

Смещение траектории трала в отношении траектории судна c_n будет равно разности радиусов поворота

$$c_n = r - R_b, \quad (40)$$

где c_n — смещение траектории трала;
 R_b — радиус поворота характерной точки судна;
 r — радиус поворота характерной точки трала.
 Учитывая выражения (39) и (40), можем написать

$$c_n = \sqrt{R_c^2 + L_u^2 - l^2} - R_b.$$

Максимальное смещение трала будет при

$$R_c^2 + L_u^2 - l^2 = 0,$$

$$l^2 = L_u^2 + R_c^2.$$

При этом условии смещение равно радиусу поворота судна, который равен длине базы буксировки. В этом положении трал будет оставаться на месте, а судно будет описывать циркуляцию вокруг трала.

При условии, когда

$$l^2 > L_u^2 + R_c^2, \quad (41)$$

происходит «складывание» системы судно-трал.

ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ БУКСИРУЕМОГО ТРАЛА ПРИ ПОВОРОТЕ ПРОМЫСЛОВОГО СУДНА

Определение траектории трала аналитическим методом в условиях практики без применения технических средств весьма сложно особенно, если траектория судна будет ломаной линией или комбинацией отрезков прямой и дуг кривых различных радиусов.

Все эти неудобства устраняются, если к определению траектории трала подойти графически. Графический метод определения основан на том же принципе, что и аналитический, т. е. база буксировки (прямая ab) всегда направлена по касательной к траектории точки a (характерная точка трала).

Рассмотрим движение трала, положение которого полностью определяется прямой $\overline{b_0 a_0}$ (рис. 5). Характерная точка судна b_0 движется по криволинейной направляющей траектории $n-n$. Необходимо найти графическим построением траекторию буксируемой точки a_0 .

Возможны два варианта движения прямой $\overline{b_0 a_0}$ при перемещении точки b_0 из ее начального положения в последующее положение b_1 .

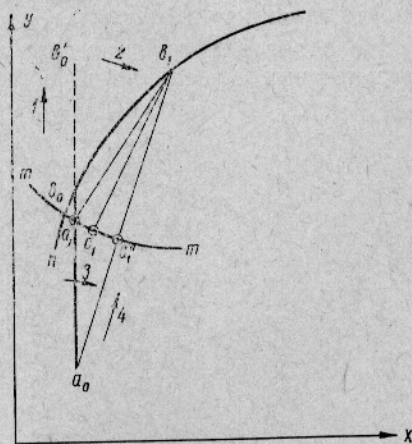


Рис. 5. Схема графического определения положения трала.

Первый вариант. Прямолинейно — поворот. Прямая движется первоначально прямолинейно (по стрелке 1) до тех пор, пока точка b_0 не займет положение b_0' , а точка a_0 — положение a_1' , т.е. окажется на дуге $m-m$, описанной радиусом b_0a_0 из точки b_1 (новое положение точки b_0). Далее происходит поворот прямой (по часовой стрелке 2) на угол b_0a_1' ; b_1 , при этом точка b_0' совместится с точкой b_1 . Прямая $a_1'b_1$ определяет первое крайнее положение траля. Действительно, трал не может лежать левее прямой $a_1'b_1$, так как это означало бы, что трал был повернут предварительно против часовой стрелки из своего начального положения, что противоречит фактически заданному движению: прямолинейно — вперед.

Второй вариант. Поворот — прямолинейно.

Прямая a_0b_0 поворачивается вокруг точки a_0 (по часовой стрелке 3) на угол $b_0a_0b_1$. Следовательно, трал займет положение в направлении точки b_1 . Далее трал движется прямолинейно в этом направлении (по стрелке 4) до тех пор, пока точка a_0 не достигнет дуги $m-m$ и не займет место точки a_1'' . Прямая $a_1''b_1$ определяет второе крайнее положение траля. Действительно, трал не может лежать правее прямой $a_1''b_1$, так как это означало бы, что трал был предварительно повернут на больший угол, чем намечалось, а при этом точка b_0 не совместились бы с точкой b_1 , что невозможно по построению.

Таким образом, при выборе достаточно малого расстояния между последовательными положениями характерной точки судна b_0, b_1, b_2 и т. д. расстояния $a_1'-a_1''$ будут также достаточно малыми. Действительное положение траля, т. е. точки a_1 (характерной точки траля), находится на дуге $m-m$ между точками a_1' и a_1'' . Если расстояние между этими точками мало, искомое положение точки a_1 при переходе точки b_0 в точку b_1 может быть найдено с достаточной степенью точности делением расстояния $a_1'a_1''$ пополам.

При бесконечно малых расстояниях b_0b_1 оба варианта построения дадут один и тот же результат, т. е. точки a_1' и a_1'' , найденные обоими вариантами, совпадут одна с другой и будут находиться на действительной траектории точки a_0 .

На основании изложенного аналитическое определение траектории вполне можно заменить графически путем построения двух траекторий

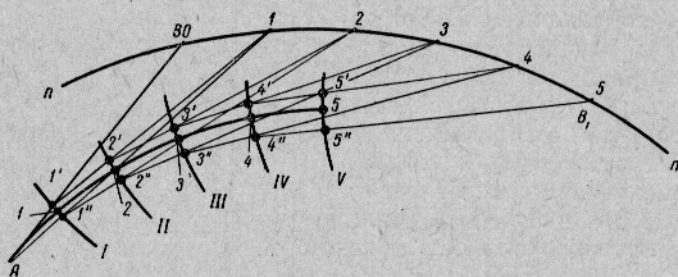


Рис. 6. Построение траектории движения траля при криволинейном движении судна.

по обоим вариантам с последующим делением расстояния между ними пополам.

Практически графическое определение траектории траля заключается в следующем (рис. 6). Допустим, что кривая $n-n$ есть задан-

ная траектория судна, AB — первоначальное положение базы буксировки l . Требуется определить траекторию точки A . Делим дугу BB_1 на равные части. Чем больше мы возьмем этих частей, тем точнее будет результат. Затем из полученных точек $1, 2, 3, 4$ и 5 на кривой BB_1 описываем дуги I, II, III, IV и V радиусом, равным длине буксировки l , в том месте, где по предположению должна проходить траектория точки A .

Траектория по варианту «прямолинейно — поворот» находится так: соединяем точку A с точкой B и в месте пересечения AB с дугой I находим точку $1'$; соединяем точку 1 кривой BB_1 с точкой $1'$ и в месте пересечения этой прямой с другой II находим точку $2'$; соединим точку 2 кривой BB_1 с точкой $2'$ и в месте пересечения этой прямой с дугой III находим точку $3'$ и т. д.

Полученные точки $1', 2', 3', 4'$ и $5'$ будут лежать на траектории точки A , определенной по варианту «прямолинейно — поворот».

Траектория по варианту «поворот — прямолинейно» определяется аналогично, но с той только разницей, что в этом случае соединяем точку A с точкой 1 кривой BB_1 и получаем точку $1''$; $1''$ с 2 — получаем $2''$; $2''$ с 3 — получаем $3''$ и т. д.

Точки $1'', 2'', 3'', 4''$ и $5''$ будут лежать на траектории, определяемой по варианту «поворот — прямолинейно». Затем делим дуги ($1'—1''$), ($2'—2''$), ($3'—3''$), ($4'—4''$) и ($5'—5''$) пополам и находим точки $1, 2, 3, 4$ и 5 действительной траектории точки A .

Приведем пример построения траектории трала при быстром повороте на 90° и последующем прямолинейном движении, т. е. на постоянном курсе.

Начальное положение судна и трала определяется прямой \overline{ab} , равной базе буксировки l . Затем точка подвеса ваеров b (рис. 7) пере-

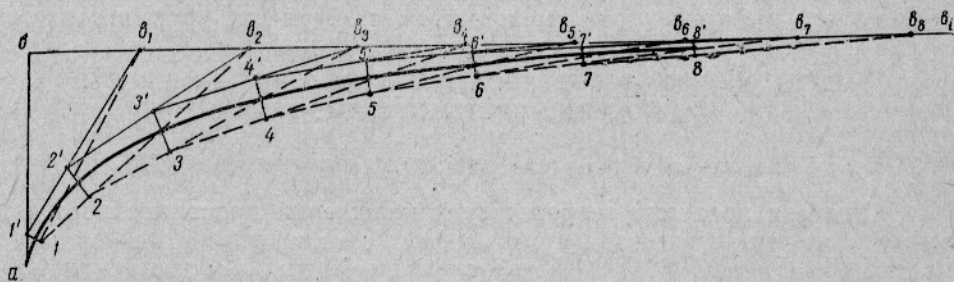


Рис. 7. Построение траектории движения трала при прямолинейном движении судна.

мещается в направлении bb_1 . При перемещении точки b в точку b_1 на величину ΔS точка a переместится в среднее положение между точками $1—1'$. Чтобы получить это положение, надо из точки b_1 радиусом \overline{ab} сделать засечку на прямой ab и соединить точку b_1 с точкой a . Затем отрезок $a1'$ откладывается на ab_1 от точки a в направлении b_1 . Получается точка 1 . Средина отрезка $1—1'$ будет находиться на трактрисе, по которой движется точка a . Аналогичные построения необходимо выполнить и для других положений точки a .

Для сокращения времени построения в условиях промысла траекторию движения трала можно строить упрощенно, т. е. по варианту «прямолинейно — поворот». Отметив начальное положение судна и

трала (рис. 8) точками b и a , прокладываем из точки b новый курс судна. Разбиваем линию курса на ряд малых участков точками 1, 2, 3, 4 и т. д. Затем радиусом \overline{ab} , равным проекции ваера на горизонтальную плоскость, поставив ножку циркуля в точку 1, засекаем линию \overline{ab} . В месте засечки получаем точку $1'$, которую соединяем линией с точкой 1. Поставив ножку циркуля в точку 2, снова радиусом ($ab = l$) засекаем

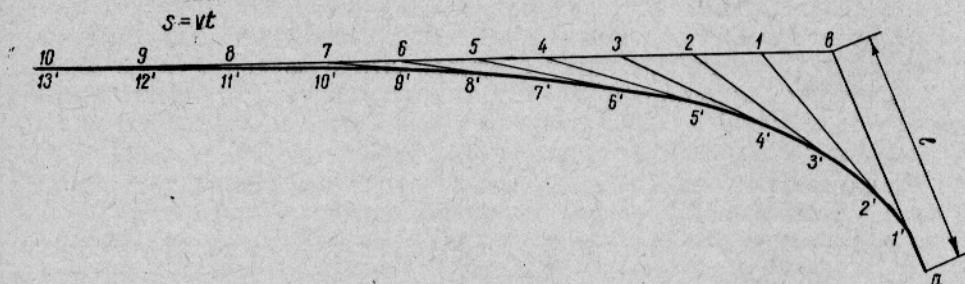


Рис. 8. Упрощенное построение траектории движения трала при прямолинейном движении судна.

линию $11'$, где получаем точку $2'$, которую также соединяем линией с точкой 2. Дальнейшее построение точек производится таким же образом. Соединив полученные точки 1, 2', 3' и т. д. плавной кривой, получим траекторию движения трала.

Рассматривая траектории движения буксируемого трала при различных поворотах промыслового судна, построенные графическим методом, можно отметить, что с увеличением базы буксировки l длина траектории трала сокращается при одной и той же длине траектории судна, а кривизна траектории уменьшается, т. е. радиус кривизны растет.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМЫ СУДНО-ТРАЛ

Методика проведения экспериментальных работ *

Опытная проверка теоретических положений криволинейного движения системы судно-трал производилась на экспериментальном рыболовном траулере РТ-26 «Треска» с буксируемым 25-метровым тралом. Испытания проводились в Баренцевом море в районе п-ова Канин Нос на глубине 50—55 и 150—160 м на ровном песчанистом и песчанистоилистом грунте. Испытываемый 25-метровый трал был вооружен по бесквартропной схеме (чертеж МЭБ № 13664 а). Вооружение нижней подборы трала грунтотропами показано на рис. 9. Распорные доски применялись овальные, одноцелевые, площадью 4,5 м², конструкции И. Р. Матросова. Длина кабелей сохранялась постоянной — 40 м.

В задачи испытаний входило определение:

- режима криволинейного движения судна при выполнении поворотов с буксируемым тралом в различных условиях;
- горизонтального раскрытия трала при криволинейном движении системы судно-трал;
- натяжения в ваерах в процессе поворотов;

* Экспериментальные работы выполнены совместно с капитаном Мурманского тралового флота Е. А. Лебедевым.

угла между ваерами и диаметральной плоскостью судна при криволинейном движении.

Экспериментальные исследования режима криволинейного движения системы судно-трал показали весьма широкий диапазон его изменения в зависимости от скорости судна, угла перекладки руля, длины вытравленных ваеров, сопротивления трала и других внешних факторов

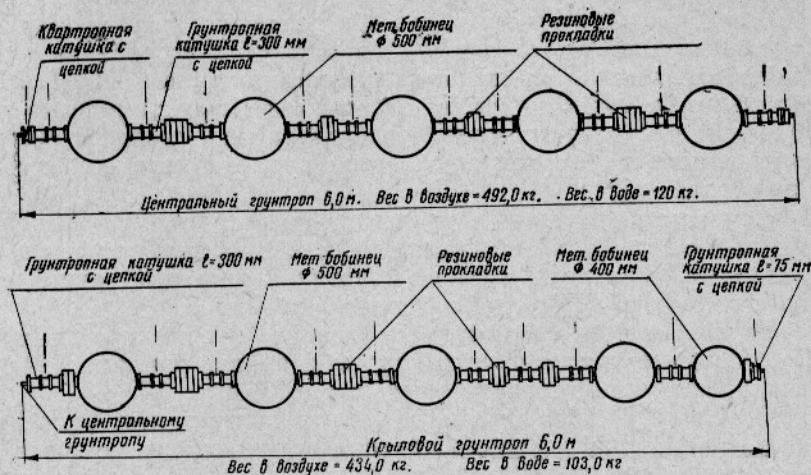


Рис. 9. Вооружение грунтропов при испытаниях 25-метрового трала.

(ветер, волна, течение и т. д.). В ходе испытаний в каждом конкретном опыте режим поворота задавался углом перекладки руля, числом оборотов винта в минуту и периодом времени, зависящим от безопасности работы трала.

Для определения положения руля использовали аксиометр — штатный судовой прибор, действующий от механического привода на колонке штурвала. Согласно правилам Морского Регистра СССР, при отклонении руля от среднего положения на каждый борт судна разница между показаниями такого аксиометра и действительным положением руля не должна превышать 2° .

Постоянное число оборотов винта поддерживалось вахтенным механиком и контролировалось по тахометрам в машинном отделении и штурманской рубке судна.

Определение скорости судна в процессе поворотов производили с помощью «планширного лага». Частота измерения скорости зависела от продолжительности поворота, и промежутки времени между измерениями колебались от 0,5 до 3 мин. При повторных поворотах по заданному режиму величину скорости уточняли и определяли как среднее арифметическое из значений скоростей, полученных при всех повторных поворотах.

Изменение курса при повороте судна отмечали по 127-миллиметровому магнитному компасу ГУ. Нормальная погрешность компаса (застой картушки) не должна превышать $\pm 0-2^\circ$. Отметка курса производилась с точностью до полградуса. Общая погрешность при снятии отсчетов курса не превышала $\pm 1^\circ$. Наблюдение за изменением курса при повороте производили следующим образом. В момент начала перекладки руля фиксировали курс судна по компасу и включали секундомер. Затем через определенные, заранее заданные интервалы изменения

курса по сигналу наблюдателя, стоящего у компаса, отмечали время по секундомеру. Промежуток времени, в течение которого руль переключивался на заданный угол, а судно продолжало идти прежним курсом, вычитали из первого интервала времени. После окончания поворота показания секундомера и соответствующее изменение курса на определенное число градусов заносили в таблицу.

В процессе испытаний производили два вида поворотов судна: на угол 90 и 180°. Следует отметить, что при поворотах на угол 180° невозможно было выполнить условие постоянства угла переключки руля до конца поворота, так как опасность повреждения трала и ПГРТ (прибор горизонтального раскрытия трала) заставляла выводить руль из заданного положения и делать поворот более плавным. Плавность поворотов контролировалась по продолжительности времени поворота и наблюдению за ваерами.

Горизонтальное раскрытие трала определяли с помощью ПГРТ. Расшифровку записей ПГРТ производили с помощью графиков тарировки, которые были построены на основании предварительных работ. Погрешность записей ПГРТ не превышала $\pm 0,5$ м.

Натяжение ваеров определяли с помощью трехтонных динамометров ДР-3, которые подключали к ваерам в районе траловых дуг. Точность измерения динамометра по паспорту ± 60 кг.

Для определения угла между ваерами и диаметральной плоскостью судна был использован способ, основанный на контроле изменения расстояний между фиксированными точками на ваерах и линии, параллельной диаметральной плоскости судна, нанесенной на планшире у стопор-блока. Фиксированные точки располагались на расстоянии в 1 м от стопор-блока и обозначались марками.

Расстояние между фиксированными точками является основанием треугольника, вершиной которого будет точка расположения стопор-



Рис. 10. Схема измерения угла между ваерами и диаметральной плоскостью судна.

теореме косинусов, на основании которой из треугольника ABC (рис. 10) находим, что

$$\cos A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc},$$

где a — измеренное расстояние, м;

b и c — известные постоянные величины ($b = c = 1$ м).

Подставив в приведенную формулу известные величины, получим очень простое выражение следующего вида:

$$\cos A = 1 - \frac{a^2}{2}. \quad (42)$$

Полученная зависимость (42) была представлена в виде табл. 1, расчет которой производился с учетом разбивки линия, предназначенного для измерения расстояний между фиксированными точками.

Таблица 1

<i>a</i> , м	γ , град	<i>a</i> , м	γ , град	<i>a</i> , м	γ , град
0,0	0,0	0,50	29,0	1,00	60,0
0,05	2,9	0,55	32,0	1,05	63,4
0,10	5,7	0,60	35,0	1,10	66,7
0,15	8,6	0,65	38,0	1,15	70,2
0,20	11,5	0,70	41,0	1,20	73,7
0,25	14,4	0,75	44,1	1,25	77,0
0,30	17,2	0,80	47,2	1,30	81,1
0,35	20,2	0,85	50,6	1,35	84,8
0,40	23,1	0,90	54,0	1,40	88,9
0,45	26,0	0,95	57,0	1,41	90,0

Угол γ , необходимый для построения траектории движения трала, находили путем суммирования угла γ_1 между диаметральной плоскостью судна и ваером, внешним по отношению к повороту, с половиной угла между ваерами:

$$\gamma = \gamma_1 + \frac{\beta_T}{2}.$$

Величина $\frac{\beta_T}{2}$ определяется по известной приближенной зависимости угла между ваерами от величины горизонтального раскрытия трала

$$\sin \frac{\beta_T}{2} = \frac{\beta_1 (l_n + l_k)}{2L l_n}, \quad (43)$$

где β_1 — горизонтальное раскрытие трала (расстояние между ключевками), снятое с диаграмм соответствующих опытов;

l_n — длина условной линии, средняя между длиной верхней и нижней подбор 25-метрового трала.

Угол γ_2 между ваером, внутренним по отношению к повороту, и диаметральной плоскостью судна измеряли для выяснения изменения угла между ваерами и влияния этого изменения на величину горизонтального раскрытия трала в процессе поворотов.

Следует отметить, что замеры углов производились при поворотах в сторону рабочего борта судна, так как при обратных поворотах ваера прижимались к борту и замеры производить было невозможно.

Определение направления и силы ветра и волнения в процессе испытаний производилось по принятой в морской практике методике штатными приборами. Действие этих внешних факторов, а также течения не учитывалось, но исключение их влияния на скорость судна осуществлялось путем повторных поворотов в обратную сторону при одном и том же заданном режиме движения судна.

Результаты исследования криволинейного движения системы судно-трал

В процессе экспериментального исследования криволинейного движения системы судно-трал перед каждым типом поворота производились пробные опыты без применения ПГРТ и динамометров, по кото-

рым устанавливался режим движения для определения всех необходимых параметров. В зависимости от условий прохождения опыта выполнялись 2—4 однотипных поворота. Условия, характеризующие эти испытания, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели	Номер испытания					
	1	2	3	4	5	6
Курс судна, град						
до поворота	260	320	300	270	180	300
после поворота	80	140	120	90	90	300
Угол поворота судна, град	180	180	120	280	90	360
Заданный угол перекладки руля, град	15	18	18	15	35	35
Время поворота судна, мин	18	12	12	12	3	7,6
Рабочий борт судна	п/б	п/б	п/б	п/б	л/б	п/б
Начальная скорость, узлы	3,2	2,9	3,6	4	2,9	3,0
Заданное число оборотов винта в мин	65	60	70	70	60	62
Глубина моря, м	155	160	45	400	160	180
Длина ваеров, м	500	500	250	800	500	500
Направление ветра, румбы	SSO	NW	WSW	NW	WSW	NW
Сила ветра, баллы	3	1	5	2	3	2
Волнение моря, баллы	2	0	3	0	2	1

Результаты исследования режима криволинейного движения системы судно-трал и замеров угла между ваерами и диаметральной плоскостью судна γ при повороте судна на угол 180° за 18 мин при длине ваеров 500 м (база буксировки 475 м) приведены в табл. 3, при пово-

Таблица 3

Δt	2	1	1	1	0,7	0,55	1,75	0,5	0,5	1	1	1	1	2	3
$\Delta\psi$	45	20	10	10	15	15	10	10	6	5	0	0	5	10	15
v	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,65	1,7	1,65	1,65	1,65	1,65	1,7	1,8	1,8
γ_1	35	52	52	52	59	66	61	64,5	65,5	61,5	51	41	43	41	38
γ	38	54	55	55	62	69	63	66	67	63	53	43	46,5	44	40
γ_2	41	52	51	51	56	61	55	58,5	59,5	55,5	51	45	49	47	45
R	245	225	550	550	260	260	1000	290	560	1120	∞	∞	1160	1160	1160

В табл. 3 принято:

Δt — промежуток времени, мин;

$\Delta\psi$ — интервалы угла поворота, град;

v — средняя линейная скорость судна в промежутках времени, м/сек;

R — радиус поворота судна, м.

роте судна на угол 180° за 12 мин при длине ваеров 500 м (база буксировки 475 м) — в табл. 4, при повороте судна на угол 180° за 12 мин

Таблица 4

Δt	1	1,3	1,7	1,9	1,1	1,5	0,5	1	1	1
$\Delta\psi$	20	20	20	20	20	20	10	10	20	20
v	1,48	1,34	1,5	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8
γ_1	15	30,5	41	48,0	54	51,5	63,5	62,5	68,5	73
γ	18	33	43	50	56	60	65	64	70	74
γ_2	21	35,5	45	51,5	57	60,5	61	60	64	70
R	255	300	440	520	325	440	295	590	310	310

при длине ваеров 250 м (база буксировки 245 м) — в табл. 5, при повороте судна на угол 180° за 12 мин при длине ваеров 800 м (база буксировки 700 м) — в табл. 6.

Таблица 5

Δt	1	2	2	1,5	1	1	1	1,5	1
$\Delta\psi$	20	40	30	20	10	0	20	25	15
v	1,6	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9
γ_1	13	30	34	33	30	19	28	31	28
γ	18	35	38	37	34	23	32	35	32
γ_2	23	40	42	41	38	27	36	39	36
R	265	280	395	470	610	∞	310	370	400

Таблица 6

Δt	0	2	1	2	3	2	2
$\Delta\psi$	0	60	35	35	25	15	10
v	2,0	2,16	2,21	2,16	2,12	2,05	2,0
γ	0	50	75	87	79	75	68
R	∞	245	215	425	950	950	1100

Результаты испытаний криволинейного движения системы судно-трал при повороте судна на угол 90° за 3 мин с последующим прямолинейным движением судна приведены в табл. 7. Длина ваеров при этих опытах была 500 м.

Таблица 7

Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta\psi$	45	25	25	Постоянный курс судна						
v	1,41	1,64	2,1	2,3	22	2,05	1,15	1,7	1,65	1,65
γ	35	51	65	54	40	31	20	15	8	5
R	125	225	290	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

Построение траектории движения судна и трала по результатам испытаний

Если известна траектория движения судна, то траектория движения трала может быть найдена аналитическим или графическим методом. При обработке экспериментального материала траектория движения судна находилась по результатам определения режима криволинейного движения системы судно-трал. Поскольку траектория движения судна представляет собой кривую переменного радиуса, то для ее построения требуется знать радиусы поворота судна в различные моменты времени. Определение радиусов поворота судна производилось следующим образом. Если известен угол поворота судна $\psi = f(t)$, то радиус поворота центра вращения судна R_c также является известной функцией времени t и для любого момента времени может быть найдено его соответствующее значение. Для этого должна быть известна линейная скорость судна, которая позволит найти путь, пройденный им от начального положения за определенный промежуток времени. Вследствие этого имеем:

за промежуток времени $(t_1 - t_0)$
 путь $\Delta S_0 = v_0 (t_1 - t_0)$;
 за промежуток времени $(t_{n+1} - t_n)$;
 путь $\Delta S_n = v_n (t_{n+1} - t_n)$, где v_0 и v_n — средняя скорость судна за соответствующий промежуток времени.

Если разность $(t_{n+1} - t_n = \Delta t_n)$ достаточно мала, то без заметной погрешности можно кривую с начальной кривизной $\frac{1}{R_n}$ и конечной $\frac{1}{R_{n+1}}$ заменить дугой радиуса $R_{\text{пер}}$ (средний радиус), найденного для Δt_n , а центр кривизны принять находящимся на направлении радиуса R_n .

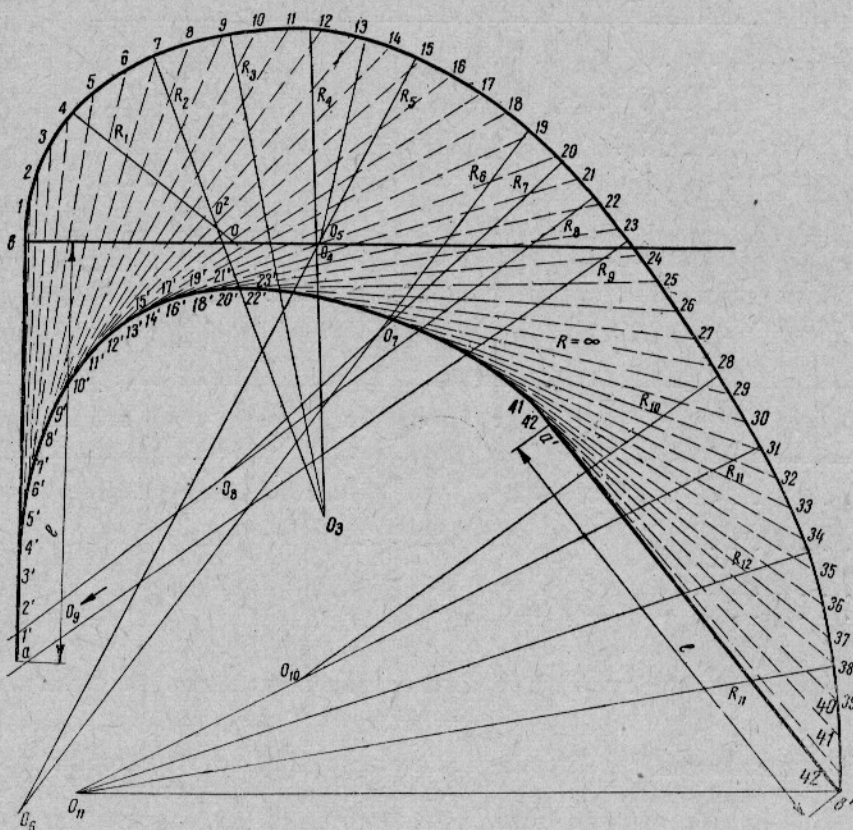


Рис. 11. Траектории движения судна и трала при повороте судна на угол 180° за 18 мин при $L=500$ м.

Средний радиус поворота судна для средней скорости за промежутки времени Δt_n найдется из следующего выражения:

$$R_{\text{нсп}} = \frac{v_n \Delta t_n}{\Delta \psi_n} = \frac{\Delta S_n}{\Delta \psi_n}, \quad (44)$$

где $\Delta \psi$ — интервал угла поворота судна.

Графическое построение траектории движения судна (центра вращения) сводится к построению кривой с непрерывно меняющейся ка-

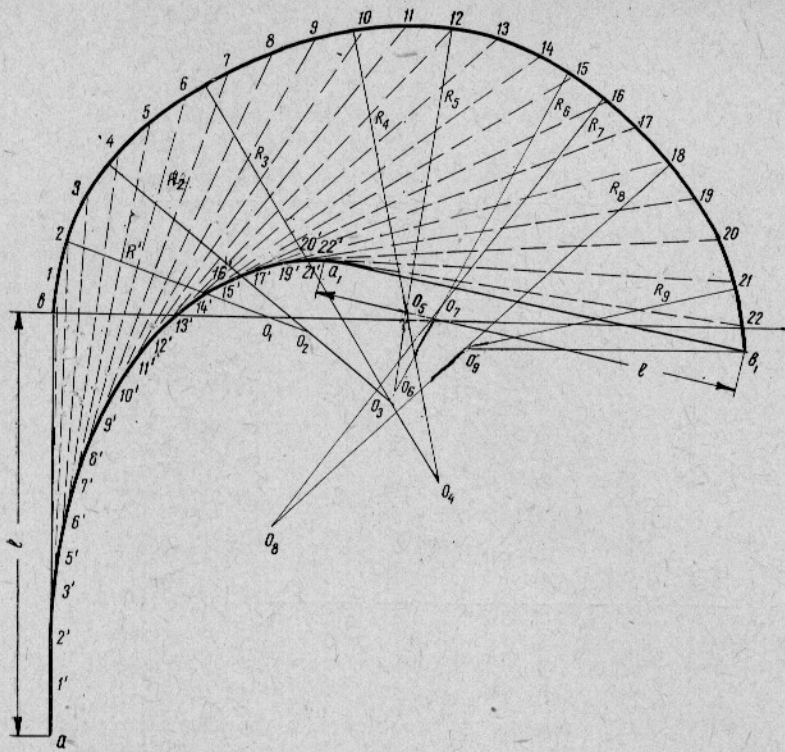


Рис. 12. Траектории движения судна и трала при повороте судна на угол 180° за 12 мин при $L=500$ м.

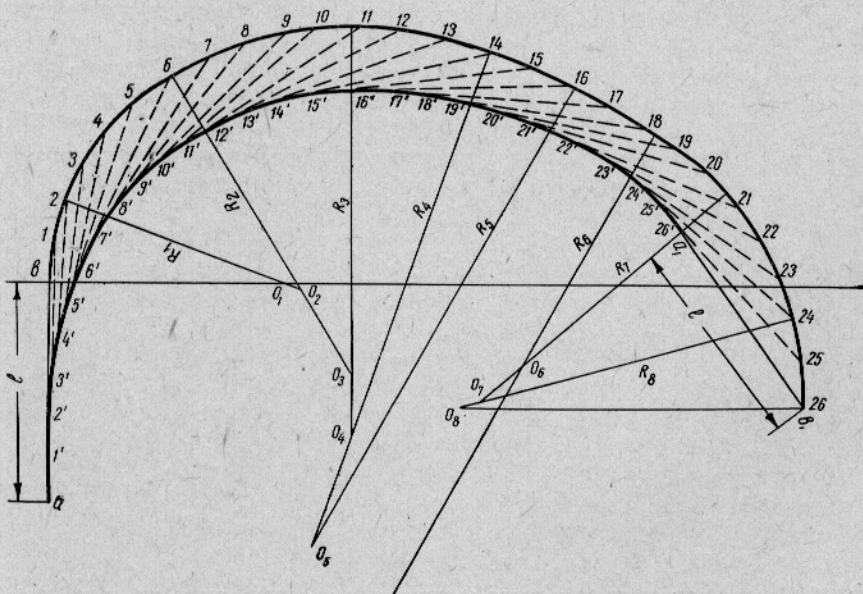


Рис. 13. Траектории движения судна и трала при повороте судна на угол 180° за 12 мин при $L=250$ м.

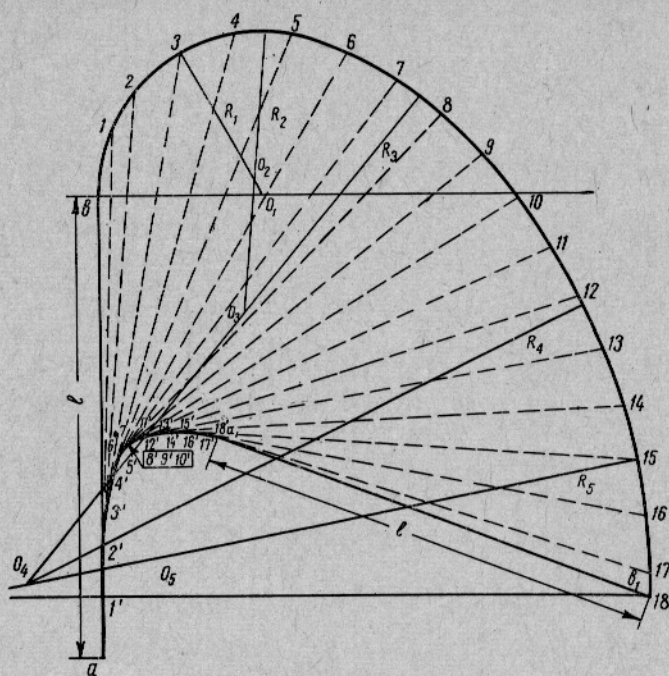


Рис. 14. Траектории движения судна и трала при повороте судна на угол 180° за 12 мин при $L=800$ м.

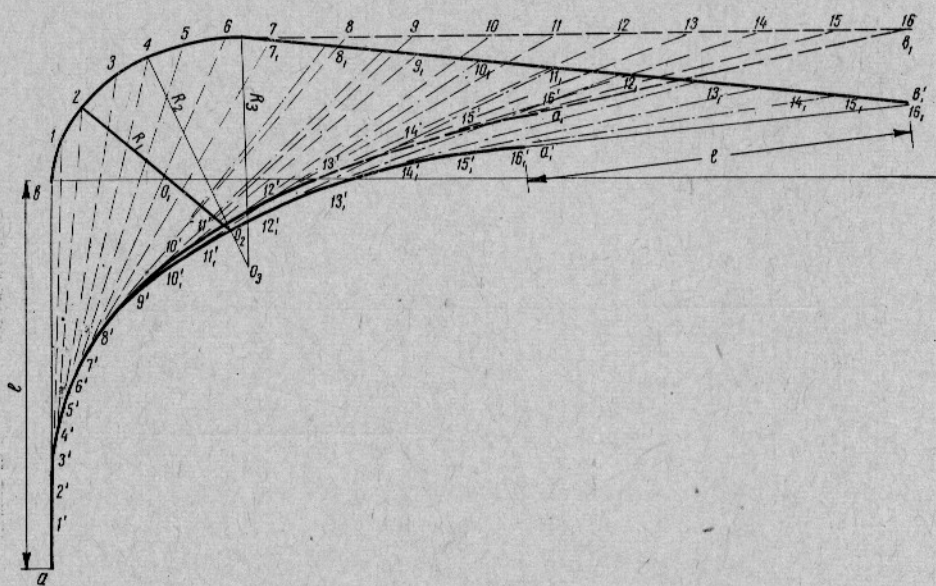


Рис. 15. Траектории движения судна и трала при повороте судна на угол 90° за 3 мин с последующим прямолинейным движением при $L=500$ м: $\angle b, b'$ — угол дрейфа, a, a' — сдвиг траектории за счет дрейфа судна.

сательной и составленной из дуг окружностей. Порядок построения следующий: выбираем промежутки времени Δt равные или неравные в зависимости от плавности ожидаемой кривой; определяем интервалы угла поворота $\Delta \psi$, соответствующие промежуткам времени Δt ; определяем радиусы поворота судна по формуле (44), соответствующие v_n ; Δt_n ; $\Delta \psi_n$. Наносим на чертеже последовательно все радиусы поворота и соответствующие им дуги. Дуги наносим поворотом циркуля каждый раз на угол $\Delta \psi$. Радиусы откладываем от конца предыдущей дуги в направлении, перпендикулярном к касательной в этой точке, т. е. считаем, что центр кривизны находится на направлении предыдущего радиуса.

На рис. 11, 12, 13, 14, 15 изображены траектории движения судна, построенные на основании изложенного графоаналитического метода, и траектории движения трала, построенные по данным замеров углов ψ .

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РАСКРЫТИЯ ТРАЛА ПРИ КРИВОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ СИСТЕМЫ СУДНО-ТРАЛ

Как упоминалось выше, для выяснения поведения трала при криволинейном движении системы судно-трал в процессе испытаний производились замеры горизонтального раскрытия трала с помощью ПГРТ. Результаты этих замеров во время типовых выборочных опытов представлены в виде диаграмм на рис. 16, 17, 18, 19. Диаграмма рис. 16 показывает зависимость горизонтального раскрытия трала от режима криволинейного движения системы судно-трал, данные которого приведены в табл. 3; диаграмма рис. 17 — соответствует данным табл. 4; диаграмма рис. 18 — данным табл. 5; диаграмма рис. 19 — данным табл. 7. На оси абсцисс диаграмм отложено время, в течение которого происходит поворот, а на оси ординат — соответствующая величина горизонтального раскрытия трала. На горизонтальной линии, параллельной оси абсцисс, отложены соответствующие интервалы угла поворота судна. На диаграммах звездочками сделаны отметки, фиксирующие момент прохождения ваеров один над другим в процессе поворота судна, а также при выходе его из поворота. Фиксирование моментов прохождения ваеров один над другим при криволинейном движении системы судно-трал в процессе испытаний производилось с целью выяснения влияния этого явления на поведение трала. Дело в том, что некоторые промысловики считают это явление опасным, влекущим за собой заворот трала. Как видно из диаграмм, необоснованность такого мнения совершенно очевидна, ибо моменты перехода ваеров один над другим не отражаются на записях ПГРТ. Больше того, в пробных опытах, о которых упомянуто выше, горизонтальное раскрытие трала существенно не изменялось или изменялось незначительно (уменьшение величины горизонтального раскрытия трала от первоначального ее значения не превышало 3 м, т. е. около 15%). Явление «кажущегося заворота» объясняется уменьшением натяжения во внутреннем по отношению к повороту ваере, вследствие чего провисание его будет больше, чем ваера, внешнего по отношению к повороту. Большая стрела провеса и воздействие гидродинамического сопротивления заставляяют ваер, внутренний по отношению к повороту, занять положение, которое наблюдается при криволинейном движении системы судно-трал.

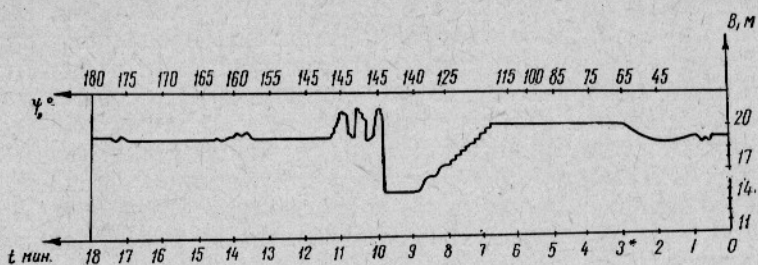


Рис. 16. Диаграмма горизонтального раскрытия трала при повороте судна на угол 180° за 18 мин при $L=500$ м.

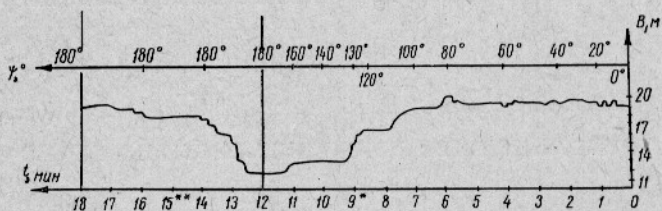


Рис. 17. Диаграмма горизонтального раскрытия трала при повороте судна на угол 180° за 12 мин при $L=500$ м.

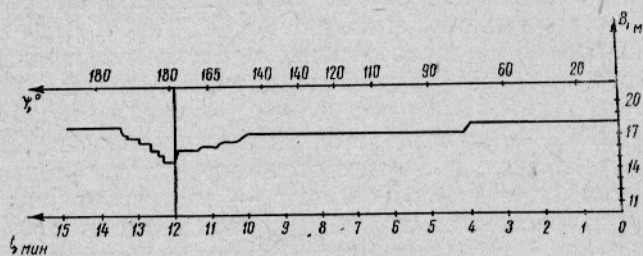


Рис. 18. Диаграмма горизонтального раскрытия трала при повороте судна на угол 180° за 12 мин при $L=250$ м.

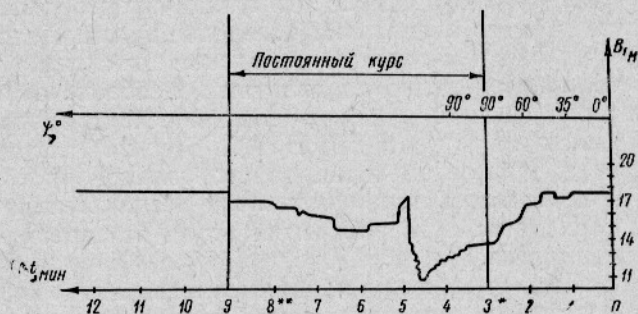


Рис. 19. Диаграмма горизонтального раскрытия трала при повороте судна на угол 90° за 3 мин с последующим прямолинейным движением при $L=500$ м.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАМЕРОВ НАТЯЖЕНИЯ ВАЕРОВ
ПРИ КРИВОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ СИСТЕМЫ СУДНО-ТРАЛ**

При установившемся прямолинейном движении системы судно-трал натяжение ваеров почти одинаково. При криволинейном движении в процессе испытаний наблюдалось уменьшение натяжения в ваерах, причем в ваере, внутреннем по отношению к повороту, натяжение уменьшилось значительно больше, чем во внешнем. Результаты замеров натяжения в ваерах при длине 500 м и повороте судна на угол 180° за 18 мин приведены в табл. 8.

Результаты замеров натяжения в ваерах при длине 250 м и повороте судна на угол 180° за 12 мин приведены в табл. 9.

В таблицах обозначено через T_1 — натяжение в ваере, внешнем по отношению к повороту, и через T_2 — натяжение в ваере, внутреннем по отношению к повороту.

Таблица 8

t , мин	ψ , град	T_1 , т	T_2 , т	t , мин	ψ , град	T_1 , т	T_2 , т
0	0	2,9	2,9	10	145	2,0	1,7
2	45	2,5	2,15	11	145	2,2	1,8
3	65	1,6	1,3	12	145	2,5	1,9
4	75	1,6	1,3	13	155	2,1	1,7
5	85	1,6	1,3	14	160	2,0	1,65
5,7	100	1,6	1,3	15	165	2,0	1,65
6,3	115	1,6	1,3	16	170	2,3	2,0
8,0	125	1,5	1,2	17	175	2,4	2,0
8,5	135	1,3	1,15	18	180	2,5	2,3
9,0	140	1,2	1,1	—	—	—	—

Таблица 9

t , мин	ψ , град	T_1 , т	T_2 , т	t , мин	ψ , град	T_1 , т	T_2 , т
0	0	2,8	2,9	9,5	140	2,55	1,95
1	20	2,7	2,1	10,5	150	2,2	1,8
2	30	2,6	2,05	11,0	165	1,8	1,6
3	60	2,6	2,05	11,5	175	1,8	1,6
4	75	2,6	2,05	12,0	180	2,0	1,6
5	90	2,6	2,1	13	180	3,0	1,7
6,5	110	2,6	2,1	14	180	2,9	2,0
7,5	120	2,6	2,15	15	180	2,8	2,2
8,5	120	2,6	2,2	16	180	2,6	2,5

Примечание. Данные в табл. 9, заключенные в штриховую рамку, характеризуют изменение натяжения в ваерах при прямолинейном движении судна и выходе трала из поворота.

Характер изменения зависимости натяжения в ваерах и угла поворота судна от времени представлен на графиках (рис. 20, 21), построенных по данным табл. 8 и 9.

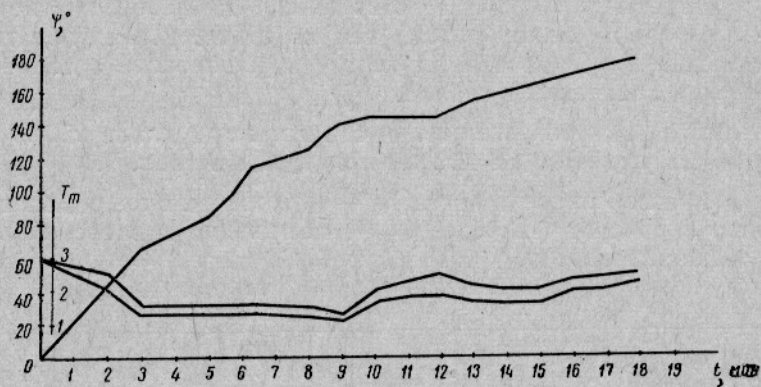


Рис. 20. Изменение угла поворота и усилия в ваерах в зависимости от времени при $L=500$ м.

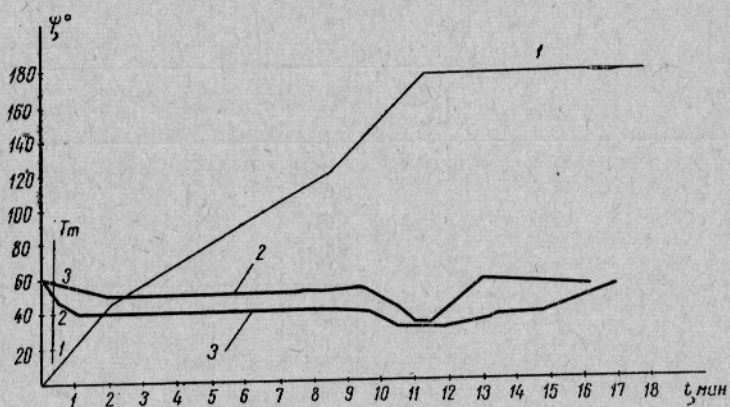


Рис. 21. Изменение угла поворота и усилия в ваерах в зависимости от времени при $L=250$ м:
 1 — прямолинейное движение; 2 — ваер внешний по отношению к повороту;
 3 — ваер внутренний по отношению к повороту.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ УГЛА МЕЖДУ
 ДИАМЕТРАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТЬЮ СУДНА И ВАЕРАМИ ДЛИНОЙ 500 м**

Для определения предельного значения угла γ , т. е. для выяснения того, насколько может возрасти угол между диаметральной плоскостью судна и ваерами длиной 500 м при минимально возможном радиусе поворота судна, были проведены специальные испытания (см. табл. 2, 6). Результаты испытаний показаны в табл. 10.

Таблица 10

t , мин	1	2	3	4	5	6	7	7,65
ψ , град	35	75	118	172	220	274	330	360
v , м/сек	1,36	1,65	2,2	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
γ , град	33	53	75	62	45	35	30	28
R , м	135	190	176	175	205	170	160	200

Зависимость угла между диаметральной плоскостью и ваерами от времени и угла поворота судна представлена графиком на рис. 22. Как

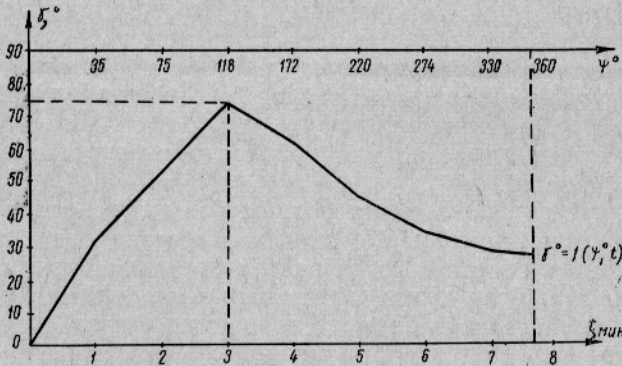


Рис. 22. Определение предельного значения угла γ при длине ваеров 500 м.

видно из графика, угол γ достигает предельного значения на третьей минуте поворота при угле поворота судна 118° и равняется 75° . После предельного положения угол между ваерами и диаметральной плоскостью судна по мере увеличения угла поворота постоянно уменьшается. Объясняется это тем, что трал прекращает свое движение по кривой, а во взаимодействии находятся только судно и буксируемые ваера, которые под действием гидродинамического сопротивления отклоняются в сторону, противоположную повороту судна, что и уменьшает угол γ .

Поскольку радиус поворота судна значительно меньше длины ваеров, то трал остается вне траектории, описанной движением судна, и его поведение после предельного положения угла γ никаких изменений не претерпевает. С возрастанием угла поворота судна до 360° ваера образуют петлю, которая, вытягиваясь при прямолинейном движении судна, переходит в заверт ваеров на стопор-блоке.

В практике тралового промысла заверт ваеров на стопор-блоке иногда возникает при неравномерном их вытравливании при спуске

трала. Промысловики, знакомые с этим явлением, для придания ваерам правильного положения производят быстрый поворот судна на 360° в сторону, обратную заверту.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Анализируя полученные данные, можно отметить следующее. Поворот системы судно-трал с прямолинейного пути происходит с различными радиусами поворота судна и трала и с переменным положением центра вращения.

Наиболее характерным параметром криволинейного движения системы судно-трал является смещение траектории движения трала относительно траектории движения судна. Величина смещения зависит от радиусов поворота судна и трала, и ее наибольшее значение наблюдается при максимальном угле ($\gamma_{\text{макс}}$) между ваерами и диаметральной плоскостью судна. Угол ($\gamma_{\text{макс}}$) может принимать различные значения в зависимости от условий поворота и по мере увеличения пути судна по кривой стремится к своему предельному значению $\pi/2$ (90°). При предельном значении угла γ ($\gamma_{\text{макс}}=90^\circ$) направление радиуса поворота судна совпадает с направлением базы буксировки l , а трал прекращает свое движение, т. е. он остается на месте. Практически, как показали испытания, остановка трала происходит раньше, чем угол ($\gamma_{\text{макс}}$) достигает своего предельного значения $\pi/2$. Это объясняется тем, что при углах отклонения ваеров от диаметральной плоскости судна, близких к 90° , тяговое усилие траулера, приложенное в точке подвеса ваеров, недостаточно для преодоления сопротивления трала и трал останавливается.

Если радиус поворота судна больше базы буксировки l , то угол γ не достигает своего предельного значения, а трал при движении по кривой не останавливается. Когда радиус поворота судна меньше базы буксировки l , движение трала имеет периодический характер до предельного значения угла γ . По мере возрастания пути судна по кривой трал постоянно сдвигается в сторону движения судна, т. е. в сторону вращения, до величины наибольшего смещения, пока не произойдет его полной остановки при предельном значении угла γ . Траектории движения судна и трала, построенные для различных случаев криволинейного движения системы судно-трал, показали, что смещение трала с уменьшением радиуса поворота судна растет сначала медленно, а потом резко возрастает, причем с увеличением длины ваеров скорость нарастания смещения увеличивается.

Учитывая изложенные выше общие положения о криволинейном движении системы судно-трал, приведем анализ типовых выборочных испытаний.

1. Поворот судна на угол 180° за 18 мин при длине ваеров 500 м. Как видно из табл. 3, максимальное значение угла γ между базой буксировки и диаметральной плоскостью судна при этом повороте не превышало 69° . Предельное же значение угла γ для этого поворота (см. рис. 22) равняется 75° . Исходя из этого, полагаем, что трал не прекращал своего движения по кривой в процессе поворота. Однако это предположение следует подтвердить данными по определению натяжения в ваерах. По графикам, изображенным на рис. 20, минимальная величина натяжения наблюдалась в интервале времени 8—9 мин и равнялась 1,2 т в ваере, внешнем по отношению к повороту, и 1,1 т в ваере, внутреннем по отношению к повороту. Сопоставив эти данные с

данными замеров натяжения в ваерах при страгивании трала с места, величина которых колебалась от 0,8 до 1,0 т, есть все основания утверждать, что трал при движении по кривой не останавливался. Диаграмма горизонтального раскрытия трала (см. рис. 16) показывает, что минимальная величина раскрытия наблюдалась в момент наибольшего уменьшения натяжения в ваерах и составила 75% от первоначального раскрытия. Если бы поворот судна был более плавным, такого уменьшения горизонтального раскрытия трала могло бы не быть и условия работы трала были бы более благоприятными. Следовательно, период времени 18 мин и средний радиус поворота судна, равный 620 м, вполне допустимы для данного поворота при длине ваеров 500 м.

Между длиной базы буксировки l и средним радиусом поворота судна наблюдалось следующее соотношение:

$$R = 1,3l,$$

что подтверждает изложенное выше положение о непрекращении движения трала по кривой при величине радиуса поворота судна большей, чем база буксировки.

Для сопоставления теоретической зависимости угла γ с экспериментальными данными произведем расчеты угла γ по формулам (37, 38). Результаты расчетов и данные фактических замеров угла γ между базой буксировки и диаметральной плоскостью судна приведены в табл. 11.

Таблица 11

ψ°	γ° опытн.	γ° расч.	Погреш- ность, %	ψ°	γ° опытн.	γ° расч.	Погреш- ность, %
45	38	39,5	+4	145	63	66,5	+5
65	54	53	-3	145	53	54	+2
75	55	55,5	+1,5	145	43	42	-2
85	55	56	+2	155	46,5	40,5	-12
100	62	64	+2	160	44	39	-11
115	69	69,5	+1	165	42	38	-9
125	63	65,5	+4	170	42	37	-12
135	66	68	+3	175	41	36	-12
140	67	69	+3	180	39	35	-10

Как видно из табл. 11, при угле поворота судна до 145° величина угла γ , вычисленная по расчетной формуле (37), мало отличается от замеров. При прямолинейном движении судна в течение 2 мин разница между расчетными данными по формуле (38) и данными замеров также мала. Наибольшая погрешность наблюдается при повторном криволинейном движении, но и здесь ее величина не превышает 12%.

2. Поворот судна на угол 180° за 12 мин при длине ваеров 500 м.

Максимальное значение угла γ (см. табл. 4) приблизилось к своему предельному значению и равнялось 74° . Остановка трала при движении по кривой произошла несколько раньше, при угле $\gamma=70^\circ$ и угле поворота судна 160° . Горизонтальное раскрытие трала (см. рис. 17) существенно не изменилось до поворота судна на 90° . Затем оно постоянно уменьшалось до прекращения движения трала и равнялось в этот момент 11,5 м, что составляет 60% от первоначальной величины раскрытия. Данные, полученные в этом опыте, показывают, что при уменьшении времени поворота от 18 до 12 мин происходит значитель-

ное ухудшение работы трала, несмотря на то, что поворот был выполнен плавно.

Между длиной базы буксировки l и средним радиусом поворота судна при этом опыте наблюдалось следующее соотношение:

$$R = 0,8 l.$$

Полученное соотношение подтверждает положение о том, что при величине радиуса поворота судна меньшей, чем база буксировки, угол γ достигает своего предельного значения и движение трала по кривой прекращается.

В табл. 12 приведены расчетные и опытные величины угла γ для рассматриваемого случая криволинейного движения системы судно-трал.

Таблица 12

ψ°	20	40	60	80	100	120	130	140	160	180
γ° опытный . . .	18	33	43	50	56	60	65	64	70	74
γ° расчетный . .	19	34,5	44	52	58	60	67	65	71	75
Погрешность, %	+6	+5	+3	+4	+4	0	+3	+2	+1,5	1,5

Как видно из табл. 12, наибольшая погрешность не превышает 6%, что говорит о хорошей сходимости расчетных данных с опытными для данного случая поворота, когда происходит постоянное увеличение смещения трала в сторону поворота судна.

3. Поворот судна на угол 180° за 12 мин при длине ваеров 250 м.

Из табл. 5 видно, что максимальное значение угла между базой буксировки и диаметральной плоскостью судна равно 38° . Средний радиус поворота судна равняется 370 м, или

$$R = 1,5 l.$$

Из диаграммы на рис. 18 и графика на рис. 21 можно заключить, что наблюдалось устойчивое криволинейное движение трала с уменьшением горизонтального раскрытия на 6%. При выходе судна из поворота устойчивость трала нарушилась, вследствие чего горизонтальное раскрытие уменьшилось на 25%. При входе судна в поворот такого явления не наблюдается. Наибольшее смещение траектории трала относительно траектории судна равно 100 м.

Результаты расчетов и опытные данные величины угла γ приведены в табл. 13.

Таблица 13

ψ°	20	60	90	110	120	120	140	165	180
γ° опытный . . .	18	35	38	37	34	23	32	35	32
γ° расчетный . .	14,5	39	42	44	38	24,5	36	38	36
Погрешность, %	+7	+10	+9	+11	+10	+6	+11	+8	+11

По данным табл. 13 видно, что погрешность результатов расчета при этом повороте не превышает 11%.

4. Поворот судна на угол 180° за 12 мин при длине ваеров 800 м.

Как уже упоминалось выше, при этом опыте замеров горизонтального раскрытия трала и натяжения в ваерах не производилось. Из рис. 14, где построены траектории движения судна и трала, видно, что движение трала по кривой прекращалось (точки 8, 9, 10). Угол γ достигал предельного значения (82°), что подтверждает теоретическое

положение о его прямой пропорциональности длине базы буксировки, т. е. чем больше длина ваеров, тем больше может быть предельное значение угла γ . Средний радиус поворота судна равен 648 м, или

$$R = 0,92 l.$$

Приведенное соотношение снова подтверждает положения пункта 2 настоящего раздела. Расчетные и опытные величины угла γ для рассматриваемого криволинейного движения представлены в табл. 14.

Таблица 14

ψ° угол поворота . .	60	95	130	155	170	180
γ° опытный	50	75	82	79	75	68
γ° расчетный	53	76	86	85	83	77
Погрешность, % . . .	+6	+1,5	+5	+7	+9	+11

5. Поворот судна на угол 90° за 3 мин с последующим прямолинейным движением при длине ваеров 500 м.

Угол γ достиг максимального значения (65°). Предельное же значение его при этой длине ваеров равно 75° . Отсюда следует, что при повороте судна на 90° при минимально возможном радиусе (руль находился в положении «на борту») трал не прекращал своего движения по кривой. Приведенное положение о том, что угол γ не достигает своего предельного значения при повороте судна на 90° , можно распространить и на другие случаи криволинейного движения системы судно-трал. Пробные подсчеты по формуле (37) показали, что угол γ в диапазоне общепринятых скоростей траления и величин вытравленных ваеров достичь своего предельного значения ($\pi/2$) не может. Такое положение возможно только при повороте судна на месте, когда радиус его поворота равен нулю. Вместе с тем, как упомянуто выше, практически предельное значение угла γ меньше $\pi/2$, поэтому для окончательного выяснения поведения трала при длине ваеров свыше 500 м требуются специальные испытания.

Как видно из рис. 19, горизонтальное раскрытие трала при этом повороте постоянно уменьшалось и в момент окончания поворота судна составляло 75% от первоначальной величины. Самое малое горизонтальное раскрытие трала наблюдалось уже после поворота судна, на второй минуте прямолинейного движения, и составляло 60% от первоначального раскрытия.

Величина среднего радиуса поворота судна равна 214 м, или

$$R = 0,45 l.$$

Сопоставление расчетных и опытных данных для рассматриваемого случая движения системы судно-трал приведено в табл. 15.

Таблица 15

t , мин	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	35	60	90	Постоянный курс						
γ° опытный	35	51	65	54	40	31	21	15	9	6
γ° расчетный	34	53	69	52,5	40,5	32	24	18	14	11
Погрешность, %	-2	+4	+6	-3	+1,5	+3	+9	+17	+25	+45

На рис. 15, где построены траектории движения судна и трала для этого опыта, дается наглядное представление о погрешности расчетных данных по сравнению с опытными. Траектория движения трала (кривая aa_1) построена по данным, рассчитанным по формуле (38), исходя из предположения, что судно движется прямолинейно, а траектория движения трала (кривая aa_1') — по фактическим замерам угла γ между базой буксировки и диаметральной плоскостью судна. На основании анализа траектории движения судна и трала удалось выяснить величину смещения судна в сторону трала при прямолинейном движении. Как уже упоминалось выше, смещение судна в сторону трала при постоянном курсе после поворота происходит под действием боковой составляющей натяжения ваеров в верхней точке подвеса, т. е. наблюдается дрейф судна в сторону трала. В данном случае угол дрейфа равен 5° . Смещение судна составляет 10% от величины пути, пройденного судном при предполагаемом прямолинейном движении, т. е. до прихода трала в кильватер судну. Несмотря на значительное смещение судна, разница в положении траекторий трала, построенных по расчетным и опытными данным, невелика. Сдвиг действительной траектории трала относительно траектории, построенной расчетным путем, составляет менее 50% величины смещения судна. На основании изложенного приходим к выводу, что расчетная формула (38), предназначенная для определения угла γ при постоянном курсе судна и криволинейном движении трала, дает результаты, вполне пригодные для практического использования.

В заключение следует отметить, что при построении траекторий движения трала по опытными данным плавность кривой его движения в промежутках времени и соответствующих им интервалах угла поворота судна достигалась графическим построением. Сопоставление величин угла γ , полученных при этом с фактическими замерами, показало, что разница между ними не превышает 2—3%. Следовательно, графический метод построения траектории движения трала дает вполне надежные результаты при анализе криволинейного движения системы судно-трал.

ВЫВОДЫ

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

Изложенные в работе аналитический и графический методы позволяют находить положение и траекторию движения трала при криволинейном движении судна с тралом. На основе разработанного аналитического метода получено уравнение (34) и расчетные формулы для двух частных случаев движения: формула (37) для криволинейного движения судна с тралом и (38) — для движения судна постоянным курсом и криволинейного движения трала, позволяющие решать практические задачи расхождения судов при совместном промысле.

Анализ расчетных формул показал, что угол между базой буксировки и диаметральной плоскостью судна прямо пропорционален этой базе при одном и том же режиме поворота. Судно с тралом занимает при этом более широкую полосу движения, что увеличивает опасность сцепления тралов. Если база буксировки больше радиуса поворота судна, относительное смещение траектории судна и трала обращается в мнимую величину. Поворот трала становится невозможным, так как происходит «складывание» системы судно-трал.

Сравнение результатов натурных испытаний с расчетными показало, что погрешность формулы (37) не превышает 12%, а формулы

(38) — 5%. Точность графического метода при известной траектории движения судна равна 2—3%.

Теоретический анализ и экспериментальные данные показывают, что в зависимости от радиуса поворота судна и базы буксировки возможны три случая криволинейного движения судна с тралом.

Если радиус поворота судна больше базы буксировки, движение трала по кривой не прекращается, что исключает возможность аварии при заверте.

Когда радиус поворота судна равен базе буксировки, то трал остается на месте и служит мгновенным центром вращения судна. В этом случае происходит поворот частей трала относительно друг друга, вследствие чего может возникнуть заверт.

Если радиус поворота судна меньше базы буксировки, происходит «складывание» судна с тралом и при углах поворота судна, близких к 180° , трал опрокидывается в сторону движения судна, что может вызвать заверт трала.

Экспериментальные исследования позволили установить, что удовлетворительная работа трала без опасности его заверта наблюдается при $R=(1,3-1,5) l$. На основании этого соотношения и выражения для определения радиуса поворота судна получена формула для практического определения режима криволинейного движения судна с тралом, который необходим для предупреждения заверта:

$$t = \frac{1,3 l \psi}{v}, \quad (45)$$

где t — время поворота судна, *сек*;

l — база буксировки (приблизительно горизонтальная проекция ваера), *м*;

ψ — угол поворота судна, *рад*;

v — линейная скорость судна при повороте, *м/сек*.

Быстрый поворот судна на $90-120^\circ$ при минимальном радиусе не влечет за собой аварию — заверт трала. В связи с этим есть полное основание рекомендовать его выполнение для предупреждения сцепления тралов при расхождении промысловых судов в случае возникновения аварийной ситуации.

Натяжение в ваерах при повороте судна с буксируемым донным тралом значительно уменьшается, вследствие чего провес ваеров увеличивается. Это влечет за собой уменьшение вертикальной составляющей натяжения ваера в точке крепления его у доски по сравнению с величиной, которая имела место при прямолинейном движении системы судно-трал. Отсюда приходим к заключению, что если траловые доски и трал на прямом курсе не отрывались от грунта, то в процессе поворота судна они оторваться от грунта не могут. Совершенно очевидно, что мнение некоторых промысловиков об отрыве трала от грунта при повороте и подтверждение этого положения в пособии для промысловиков тралового флота [14] ошибочны.

Скорость судна при криволинейном движении системы судно-трал при входе в поворот уменьшается, затем с увеличением угла между базой буксировки и диаметральной плоскостью судна увеличивается. В положении, когда угол между базой буксировки и диаметральной плоскостью судна достигнет предельного значения, скорость судна становится постоянной.

Горизонтальное раскрытие трала при криволинейном движении системы судно-трал, когда величина радиуса поворота судна меньше базы буксировки, постоянно уменьшается до положения предельного

значения угла между базой буксировки и диаметральной плоскостью судна. В этот момент прекращается поступательное движение трала по кривой. Дальнейшее криволинейное движение судна вызывает поворот трала на месте, вследствие чего может произойти при определенных условиях заверт трала.

Результаты проведенных исследований могут быть также использованы для определения элементов маневрирования судна при осуществлении прицельного траления; автоматизации процессов тралового промысла с помощью счетно-решающих устройств; корректировки правил плавания, регулирующих расхождение промысловых судов, и установления причин аварий тралов и судов на промысле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ аварий судов флота Мурманского совнархоза и рекомендации по их устранению. Вып. III. Мурманск, 1961.
2. Баранов Ф. И. Техника промышленного рыболовства. Пищепромиздат, 1960.
3. Бородатов В. А., Маевский В. М., Попов Г. С. Пособие для судоводителей тралового флота. Вып. I. Мурманск, 1956.
4. Воиткунский Я. И., Першиц Р. Я., Титов И. А. Справочник по теории корабля. Судпромгиз, 1960.
5. Загурьянов А. К. Основы маневрирования. Курс кораблевождения. Т. III. Изд. УГС ВМФ, 1958.
6. Закин Я. X. Методы анализа маневрирования свойств автопоездов. Автотрансиздат, 1961.
7. Земляновский Д. К. Расчет элементов маневрирования для предупреждения столкновения речных судов. Труды НИИВТ. Новосибирск, 1960.
8. Кадильников Ю. В. Номограммы и таблицы для тралового лова. Труды БалтНИРО. Калининград, 1955.
9. Михов Ф. М. Трал и техника тралового лова. Пищепромиздат, 1947.
10. Матросов И. Р. Заверты тралов и меры борьбы с ними. «Рыбное хозяйство», 1957, № 8.
11. Наставление по маневрированию судов при работе с тралом. Мурманск, 1958.
12. Постановление о порядке расследования промысловых происшествий, связанных с повреждением и утратой орудий лова судами флота рыбной промышленности, 1962.
13. Правила для предупреждения столкновения судов в море (ППСС). Изд. УГС ВМФ, 1963.
14. Падорин В. В., Кротова О. П. Техника работы с тралом, обработка рыбы на траулерах (пособие для промысловиков тралового флота). Вып. III. Мурманск, 1957.
15. Старовойтов П. А. Счетно-решающий прибор для определения курсовых углов корабля в процессе прицельного траления разноглубинным тралом. Труды ПИНРО. Вып. XIII. Пищепромиздат, 1962.
16. Трещев А. И. Аварии ставных неводов и борьба с ними. Пищепромиздат, 1951.
17. Федяевский К. К., Соболев Г. В. Управляемость корабля. Л., Судпромгиз, 1963.
18. Фридман С. Л. Устройство и теория промысловых тралов. Мурманск, 1957.
19. Янпольский А. Р. и Гутер Р. С. Дифференциальные уравнения. Физматгиз, 1962.