

*Д. В. Савотин*

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРЫЛЬЕВ ТРАЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ ФОРМОЙ ЯЧЕЙ В ПЕРЕДНЕЙ ЧАСТИ

Рассмотрено три варианта расчёта сил, определяющих раскрытие ячей канатных связей в канатной части трала. В первом варианте силы сопротивления трала приложены вдоль прямолинейных образующих оболочки трала. Эти образующие не являются конструктивными элементами трала – это не топенанты, это линии, соединяющие середины подбор и переднюю кромку мешка. Во втором варианте учитывается формоизменяемость ячей при условии, что они ромбовидной формы. В третьем варианте рассматривается приложение сил к ячейкам гексагональной формы. При разложении этих сил по координатным осям получаем составляющие, направленные к центру оболочки и закрывающие устье. Таким образом, в схемах имитируются силы, уменьшающие поперечное сечение устья при продольном натяжении ячей. Поскольку оболочка трала не является правильным конусом с основанием в виде круга, то направление приложения его сопротивления к гужу определим для верхней нижней пласти отдельно, исходя из количества ячей в гуже. Графически показано, что наиболее точно вертикальное раскрытие трала по подборам и горизонтальное расстояние между траловыми досками определяются при третьем варианте схематизации передней части трала. Для трала 98/640 это наиболее точное изображение его конструкции. Таким образом, на примере трала 98/640 с гексагональной ячейкой в передней части доказана необходимость учитывать форму ячей в крыльях трала при создании математических моделей для проектирования и анализа работы тралов. Показано, что только один этот фактор повышает точность определения формы трала на 3–5 %.

**Ключевые слова:** устье трала, форма ячей, расчетная схема.

### Введение

Проектирование тралов, как и любой конструкции, значительно упрощается при наличии математической модели, описывающей его рабочую форму при буксировке в воде. Моделированию тралов посвящены работы многих ученых. Нас интересуют лишь модели с пространственным изображением тралов, поскольку в них возможно наиболее полно учесть взаимодействие внешних сил и сил реакции как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости.

А. В. Дверник и Г. Н. Долин [1] предложили пространственную схему, в соответствии с которой устьевая часть пелагического трала изображена 4-мя подборками одинаковой длины. Предполагается, что под действием сил натяжения подборки принимают форму близкую к цепной линии.

В. И. Габрюк [2] применил более точное изображение трала в проекциях. Образующими оболочки трала являются не топенанты, а проекции плоскостей, в которых расположены подборки трала.

Для определения параметров кабелей В. И. Габрюк использует понятие одинарного кабеля, под которым понимается линия равнодействующей натяжений верхнего и нижнего кабелей. По его же утверждению, понятие одинарного кабеля имеет смысл только тогда, когда верхний и нижний кабели находятся в одной плоскости. Следовательно, при общепринятой для разноглубинных тралов 4-кабельной схеме, когда на ориентацию кабелей влияют силы щитков и груз-углубителей, а также крен доски, понятие одинарного кабеля не всегда применимо. В связи с этим возникают ограничения и по применению расчетной модели в целом.

Значительного числа недостатков, выявленных в предыдущих моделях, лишены математические модели конфигурации траловых систем, предложенные В. П. Карпенко [3]. Они основаны на пространственных схемах, в которых передняя часть трала изображается 4-мя топенантами и 4-мя подборками. В моделях В. П. Карпенко реализовано условие взаимосвязанности вертикального и горизонтального раскрытий устья трала.

Все упомянутые авторы в схематизации крыловой и сетной оболочки трала используют изображение только основных образующих каркаса трала – топенантов. К этим образующим прилагаются силы сопротивления канатно-сетной части трала. Отметим, что в схеме приложения сил не учитывались конструктивные особенности тралов, такие как форма ячей крыльев и гужевого пояса, длина связей и их количество.

Целью нашего исследования являлось определение зависимости точности расчета формы трала от степени упрощения изображения передней части трала. Анализ проведен по расчету формы трала 98/640, имеющего в передней части, сразу после гужевого пояса, шестигранную ячейку.

**Варианты приложения сил натяжения элементов оболочки трала**

В целом трал схематизируется согласно математической модели 3WC1 [4]. В расчете формы трала определение усилий осуществлено по одному из трёх вариантов приложения сил натяжения элементов оболочки трала.

**Вариант 1.** Силы сопротивления трала  $R_T$  приложены вдоль прямолинейных образующих  $C_B A$ ,  $C_H A$ ,  $E A$ ,  $E' A$  (рис. 1, а).

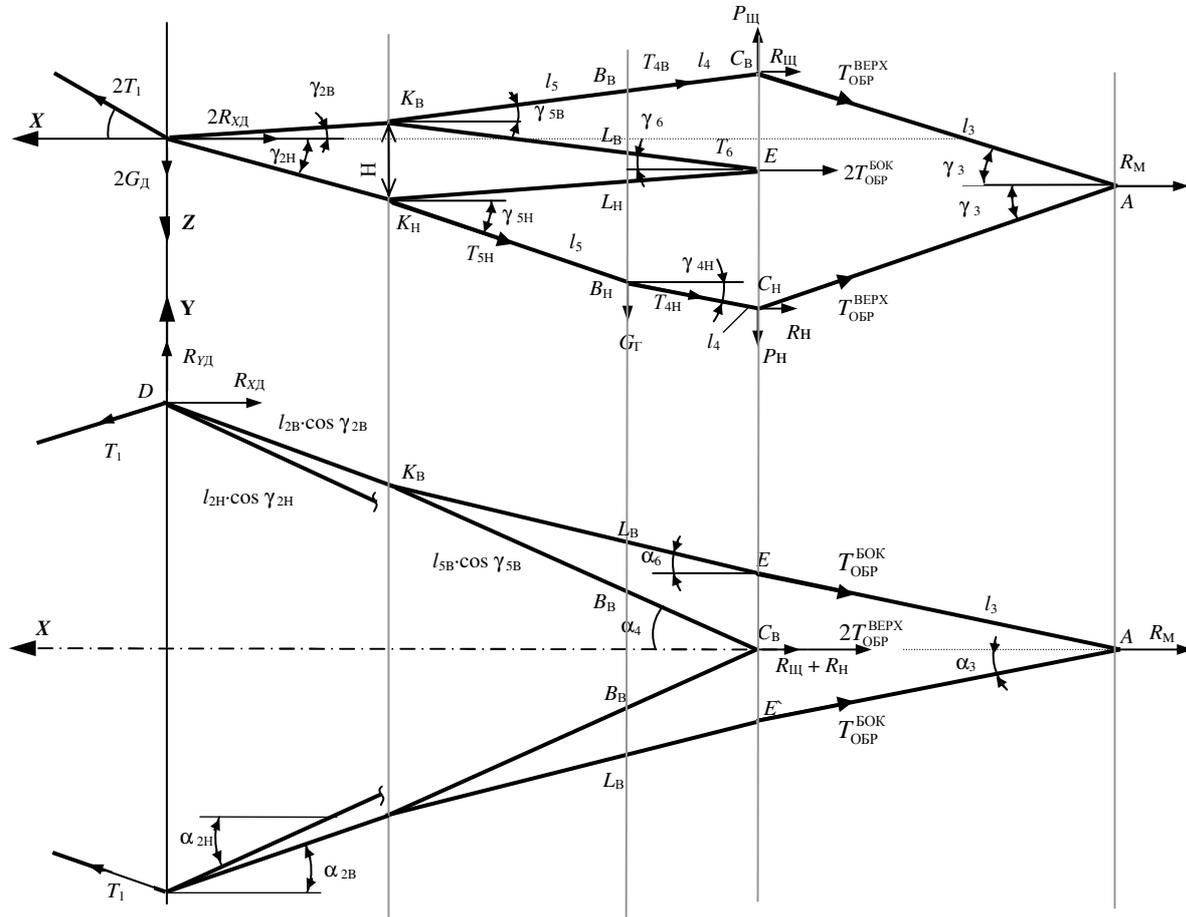


Рис. 1. Расчетная схема задачи раскрытия трала для симметричного случая моделей типа 3WC1

Эти образующие не являются конструктивными элементами трала – это не топенанты, это линии, соединяющие середины подбор и переднюю кромку мешка.

В этом случае направление действия сил натяжения образующих  $T_{OБP}^{BEPX}$  (для верхней/нижней пласти) и  $T_{OБP}^{BOK}$  (для боковых пластей) определяются по проекциям натяжений на диаметральную плоскость – углами  $\gamma_i$ , на горизонтальную плоскость – углами  $\alpha_i$ :

$$T_{OБP}^{BEPX} = \frac{(R_T \cdot 0,5 + R_M)}{\cos(\alpha_3)},$$

$$T_{OБP}^{BOK} = \frac{(R_T \cdot 0,5 + R_M)}{\cos(\gamma_3)},$$

где  $R_M$  – сила сопротивления мешка трала;  $R_T$  – сила сопротивления сетной оболочки трала.

Соответственно, при разложении этих сил по координатным осям получаем составляющие, направленные к центру оболочки и закрывающие устье. Таким образом, в схеме имитируются силы, уменьшающие поперечное сечение устья при продольном натяжении ячей.

Натяжение в верхней подборе  $T_{4В}$  и нижней подборе  $T_{4Н}$  определим с учетом стягивающих сил, образующихся в канатно-сетной оболочке:

$$T_{4B} = \operatorname{arctg} \frac{(P_{\Pi} - 0,25 (R_T + R_M) \operatorname{tg} (\gamma_3))}{\sin (\gamma_{5B}) \cos (\alpha_{4B})},$$

$$T_{4H} = \operatorname{arctg} \frac{(P_H - 0,25 (R_T + R_M) \operatorname{tg} (\gamma_3))}{\sin (\gamma_{4H}) \cos (\alpha_4)}.$$

Углы атаки этих элементов:

$$\gamma_{4H} = \operatorname{arctg} \frac{P_{\Pi} - 0,25 (R_T + R_M) \operatorname{tg} (\gamma_3)}{R_{\Pi} + 0,25 (R_T + R_M)},$$

$$\gamma_{4H} = \operatorname{arctg} \frac{P_H - 0,25 (R_T + R_M) \operatorname{tg} (\gamma_3)}{R_H + 0,25 (R_T + R_M)},$$

где  $P_{\Pi}$  – подъёмная сила гидродинамического щитка;  $R_{\Pi}$  – сила сопротивления гидродинамического щитка;  $P_H$  – потопляющая сила оснастки нижней подборы;  $R_H$  – сила сопротивления оснастки нижней подборы.

Крепление грузов весом  $G_{\Gamma}$  к голым концам нижней подборы создаёт угол наклона нижнего кабеля:

$$\gamma_{5H} = \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot G_{\Gamma} + P_H - 0,25 (R_T + R_M) \operatorname{tg} (\gamma_3)}{0,25 (R_T + R_M)},$$

и, соответственно, натяжение нижнего кабеля

$$T_{5H} = \operatorname{arctg} \frac{\left( \frac{(L_4 + L_5) G_{\Gamma}}{L_4} + P_H - 0,25 (R_T + R_M) \operatorname{tg} (\gamma_3) \right)}{\sin (\gamma_{5H}) \cos (\alpha_{4H})},$$

где  $L_4$  – длина верхней подборы с голым концом;  $L_5$  – длина кабеля.

Натяжение в боковых подборах  $T_6$  определяется приложением сил сопротивления боковых пластей канатно-сетной оболочки, если считать, что углы атаки боковых подбор равны  $\gamma_6$ :

$$T_6 = \frac{0,25 \cdot R_T}{\cos (\gamma_6)},$$

$$\gamma_6 = \arcsin \frac{Y_E}{(L_6 + L_5) \cos (\alpha_3)},$$

где  $Y_E$  – координата точки  $E$ , определяющая горизонтальное раскрытие устья;  $L_6$  – длина боковых подбор с голыми концами.

**Вариант 2.** Силы сопротивления трала приложены к ячейм, форма которых принимается ромбовидной, с шагом равным длине косых связей ячеей (рис. 2). Направление действия сил реакции  $N_T$  соответствует не положению топенантов, а положению сторон ячеей (рис. 2).

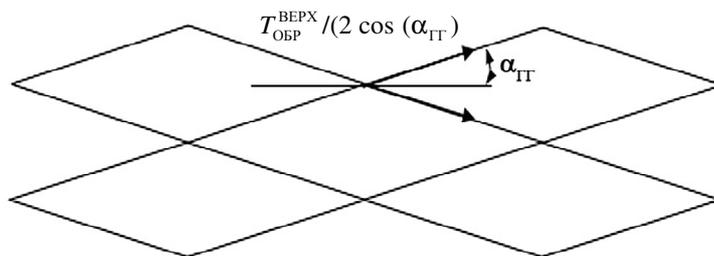


Рис. 2. Схема распределения сил натяжения в ячейх

В этом случае:

– угол раскрытия ячеи в горизонтальной плоскости:

$$\alpha_{\Gamma} = \arcsin \frac{B_{TE}}{N_{\Gamma} \cdot 2 \cdot L_{\Gamma}},$$

где  $B_{TE}$  – расстояние между концами крыльев трала;  $N_{\Gamma}$  – число ячеи в гужевом поясе по горизонтали (верхняя пласт);

– угол атаки кабелей в горизонтальной плоскости:

$$\alpha_2 = \arctg \frac{((T_{\text{ОБП}}^{\text{БОК}} \sin(\alpha_3) + R_{\Gamma} \cdot 0,25 \sin(\alpha_3) + T_4 \sin(\alpha_4)) \cos(\gamma_{4В}))}{(T_4 \cos(\alpha_4) + T_{\text{ОБП}} \cos(\alpha_3) + R_{\Gamma} \cdot 0,25)}.$$

Поскольку оболочка трала не является конусом с прямолинейными образующими, то направление приложения его сопротивления к гужу определим для верхней  $\alpha_{\GammaВ}$  и нижней  $\alpha_{\GammaН}$  пластей, исходя из количества ячеи в гуже:

$$\alpha_{\GammaВ} = \arcsin \frac{L_3 \cdot \sin(\gamma_{3В})}{N_{\Gamma} \cdot 2 \cdot L_{\Gamma}},$$

$$\alpha_{\GammaН} = \arcsin \frac{L_3 \cdot \sin(\gamma_{3Н})}{N_{\Gamma} \cdot 2 \cdot L_{\Gamma}},$$

где  $L_3$  – длина образующих оболочки трала;  $L_{\Gamma}$  – суммарная длина связей в ячеях гужевого пояса.

Углы для голых концов  $\gamma_{5В}$  (верхний),  $\gamma_{5Н}$  (нижний) и нижней подборы  $\gamma_{4Н}$ :

$$\gamma_{5В} = \arctg \frac{(P_{\text{Ш}} - 0,25 \cdot R_{\Gamma} \cdot \text{tg}(\alpha_{\GammaВ}) - 0,25 \cdot R_{\text{М}} \cdot \text{tg}(\gamma_{3В}))}{(R_{\text{Ш}} + 0,25(R_{\Gamma} + R_{\text{М}}))},$$

$$\gamma_{5Н} = \arctg \frac{2 \cdot G_{\Gamma} + T_{4Н} \sin(\gamma_{4Н})}{T_{4Н} \cdot \cos(\gamma_{4Н})},$$

$$\gamma_{4Н} = \arctg \frac{(P_{\text{Н}} - 0,25 \cdot R_{\Gamma} \cdot \text{tg}(\alpha_{\GammaН}) - 0,25 \cdot R_{\text{М}} \cdot \text{tg}(\gamma_{3Н}))}{(0,25 \cdot R_{\Gamma} + 0,25 R_{\text{М}})}.$$

**Вариант 3.** Силы сопротивления трала приложены к ячеям, имеющим гексагональную форму (рис. 3). В каждый момент времени вектор натяжения в ячее направлен по линии  $KM$  (пунктирная линия).

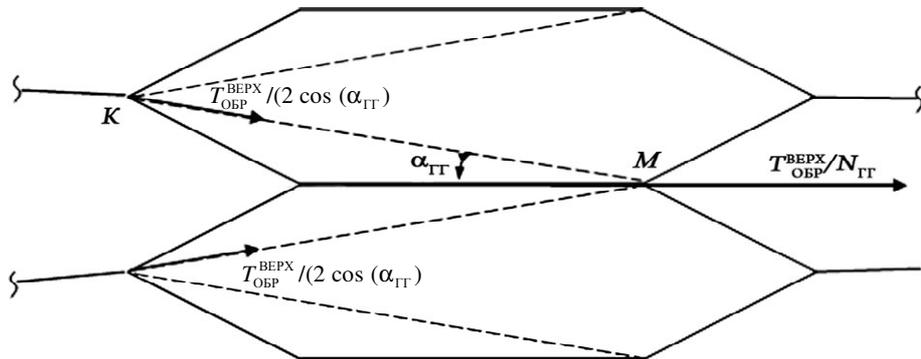


Рис. 3. Схема распределения сил натяжения в ячеях гексагональной формы

В этом случае направление действия силы внутри гексагональной ячеи:

– боковых пластей:

$$\alpha_{\Gamma} = \arcsin \frac{B_{TE}}{(L_{\Gamma} + N_{\Gamma} \cdot 2 \cdot \sqrt{L_{\Gamma}^2 - (B_{TE} / (0,5 \cdot N_{\GammaВ}))^2})};$$

– верхней пласти:

$$\alpha_{ГВ} = \arcsin \frac{L_3 \sin(\gamma_{3В})}{L_T + N_{ГВ} \cdot 2 \sqrt{L_T^2 - ((L_3 \cdot \sin(\gamma_{3В})) / (0,5 \cdot N_{ГВ}))^2}};$$

– нижней пласти:

$$\alpha_{ГН} = \arcsin \frac{L_3 \sin(\gamma_{3Н})}{L_T + N_{ГВ} \cdot 2 \sqrt{L_T^2 - ((L_3 \sin(\gamma_{3Н})) / (0,5 \cdot N_{ГВ}))^2}},$$

где  $N_{ГВ}$  – число ячеек в гужевом поясе по вертикали (боковая пласти).

Углы кабелей и голых концов:

$$\gamma_{5В} = \arctg \left( \frac{P_{Щ} - 0,25 \cdot R_T \cdot \tg(\alpha_{ГВ}) - 0,25 \cdot R_M \cdot \tg(\gamma_{3В})}{R_{Щ} + 0,25(R_T + R_M)} \right),$$

$$\gamma_{4Н} = \arctg \left( \frac{P_H - 0,25 R_T \cdot \tg(\alpha_{ГН}) - 0,25 \cdot R_M \cdot \tg(\gamma_{3Н})}{0,25 R_T + 0,25 R_M} \right),$$

$$\gamma_{5Н} = \arctg \left( \frac{2 \cdot G_T + T_{4Н} \sin(\gamma_{4Н})}{T_{4Н} \cos(\gamma_{4Н})} \right).$$

Углы атаки верхнего ( $\alpha_{2В}$ ) и нижнего ( $\alpha_{2Н}$ ) кабелей в горизонтальной плоскости:

$$\alpha_{2В} = \arctg \frac{(T_{ОБП}^{БОК} \sin(\alpha_3) + R_T \cdot 0,25 \sin(\alpha_{ГТ}) + T_{4В} \sin(\alpha_{4В})) \cos(\gamma_{4В})}{(T_4 \cos(\alpha_4) + T_{ОБП}^{БОК} \cos(\alpha_3) + R_T \cdot 0,25)},$$

$$\alpha_{2Н} = \arctg \frac{(T_{ОБП}^{БОК} \sin(\alpha_3) + R_T \cdot 0,25 \sin(\alpha_{ГТ}) + T_{4В} \sin(\alpha_{4Н})) \cos(\gamma_{4Н})}{(T_{4Н} \cos(\alpha_{4Н}) + T_{ОБП}^{БОК} \cos(\alpha_3) + R_T \cdot 0,25)}.$$

Результаты вычислений относительно длины ваев  $L$  и массы грузов-углубителей  $M_T$  представлены на рис. 4, 5.

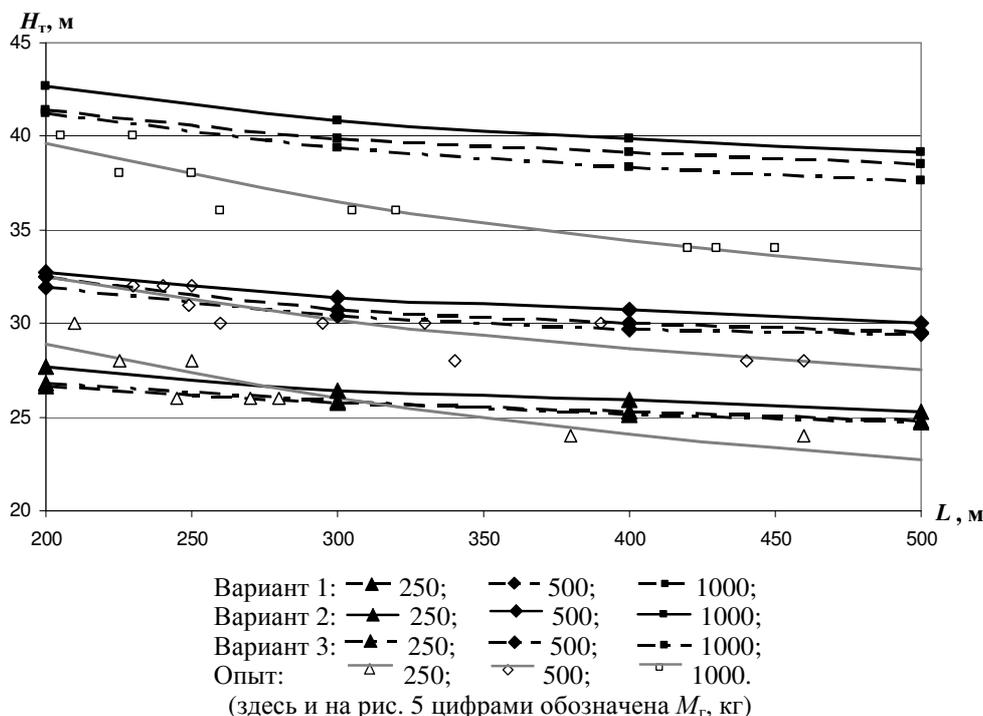


Рис. 4. Расчетные значения  $H_T$  в сравнении с экспериментальными данными

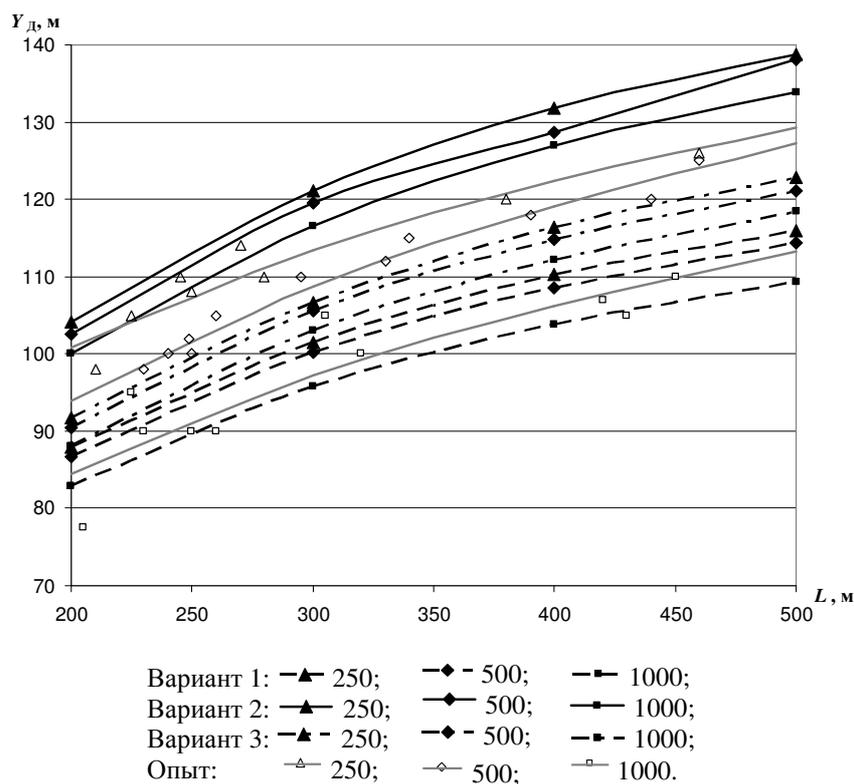


Рис. 5. Расчетные значения  $Y_d$  в сравнении с экспериментальными данными

Из графиков на рис. 4, 5 видно, что наиболее точно вертикальное раскрытие трала по подборам и горизонтальное расстояние между траловыми досками определяются при третьем варианте схематизации передней части трала. Для трала 98/640 это наиболее точное изображение его конструкции.

### Заключение

В ходе исследований нами было рассмотрено три варианта расчёта сил, определяющих раскрытие ячее канатных связей в канатной части трала.

- силы сопротивления трала приложены вдоль прямолинейных образующих;
- силы сопротивления трала приложены к ячейам, форма которых принимается ромбовидной, с шагом равным длине косых связей ячеей;
- силы сопротивления трала приложены к ячейам, имеющим гексагональную форму.

На примере трала 98/640 с гексагональной ячейей в крыловой части доказана необходимость учитывать форму ячеей в крыльях трала при создании математических моделей для проектирования и анализа работы тралов, т. к. только один этот фактор повышает точность определения формы трала на 3–5 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дверник А. В. Расчетные схемы для определения сил оснастки пелагического трала / А. В. Дверник, Г. М. Долин // Тр. Калининград. техн. ин-та рыбной пром-сти и хоз-ва. 1975. Вып 57. С. 84–91.
2. Габрюк В. И. Параметры разноглубинных тралов / В. И. Габрюк. М.: Агропромиздат, 1988. 214 с.
3. Карпенко В. П. Основы теории и расчета устройств раскрытия траловых систем: дис. ... д-ра техн. наук / В. П. Карпенко. Керчь, 1996. 360 с.
4. Савотин Д. В. Совершенствование расчетной схемы и математической модели раскрытия и конфигурации траловой системы / Д. В. Савотин. Рыбное хозяйство Украины. Спец. вып. 2002. № 7. С. 44–46.

Статья поступила в редакцию 21.05.2015

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Савотин Дмитрий Вячеславович** – Россия, 298309, Керчь; Керченский государственный морской технологический университет; ассистент кафедры «Промышленное рыболовство»; Scheffield@yandex.ru.



*D. V. Savotin*

**MATHEMATICAL MODELING OF TRAWL WINGS  
WITH DIFFERENT SHAPE OF MESHES IN THE FRONT PART**

**Abstract.** Three variants of calculation of forces determining the disclosure of meshes of the rope chains in the rope part of trawl are considered. In the first variant the forces of trawl resistance are attached along rectilinear generating lines of the trawl shell. These generating lines are not the structural elements of trawl, they are not lastridges, they are lines connecting the middle of the rope and the front line of the net. In the second variant the mesh variability is taken into account in case of their diamond-shaped form. In the third variant the trawl resistance is applied to hexagonal shaped meshes. At decomposition of these forces on co-ordinate axes, we get components, directed to the shell center and closing a mouth. Thus, forces, diminishing the cross section of trawlmouth at the longitudinal pulling of meshes, are imitated in a chart. As a shell of trawl is not a correct cone with a circle basis, the direction of resistance appliance to the tug will be defined separately for overhead and lower plate, coming from the amount of meshes in a tug. From the presented charts it is evidently that the vertical opening of trawl mouth and horizontal distance between trawling boards is most exactly determined in the third variant of schematization of the trawl forehand. For a 98/640 meter trawl it is the most exact depiction of its construction. Thus, on the example of 98/640 meter trawl with hexagonal meshes in forepart, a necessity to take into account the form of meshes in the forepart, when creating the mathematical models for designing and analysis of trawl work, is proved. It was shown that this only factor promotes accuracy of determination of trawl form by 3–5 %.

**Key words:** trawl mouth, form of mesh, calculation chart.

**REFERENCES**

1. Dvernik A. V., Dolin G. M. Raschetnye skhemy dlia opredeleniia sil osnastki pelagicheskogo trala [Calculating charts for determination of the forces of pelagic trawl]. *Trudy Kaliningradskogo tekhnicheskogo instituta rybnoi promyshlennosti i khoziaistva*, 1975, iss. 57, pp. 84–91.
2. Gabriuk V. I. *Parametry raznoglubinnykh tralov* [Parameters of different depth trawls]. Moscow, Agropromizdat, 1988. 214 p.
3. Karpenko V. P. *Osnovy teorii i rascheta ustroystv raskrytiia tralovykh sistem. Dis. d-ra tekhn. nauk* [The fundamentals of the theory and calculation of devices of disclosure of the trawl systems. Dis. doc. tech. sci.]. Kerch, 1996. 360 p.
4. Savotin D. V. Sovershenstvovanie raschetnoi skhemy i matematicheskoi modeli raskrytiia i konfiguratsii tralovoi sistemy [Improvement of the calculation chart and mathematical model of disclosure and configuration of the trawl system]. *Rybnoe khoziaistvo Ukrainy. Spetsial'nyi vypusk*, 2002, no. 7, pp. 44–46.

The article submitted to the editors 21.05.2015

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Savotin Dmitriy Vyacheslavovich** – Russia, 298309, Kerch; Kerch State Maritime Technological University; Assistant of the Department "Commercial Fishery"; Scheffield@yandex.ru.

