5.3. Методы оптимизации проектных характеристик глубоководных тралов

5.3.1. Постановка задачи оптимизации глубоководных тралов

Особый случай оптимизации имеет место при проектировании глубоководного трала. При проектировании глубоководного трала (как разноглубинного, так и донного) одна из основных задач, в числе решаемых, заключается в обеспечении заданной глубины траления Y при ограниченной рабочей длине ваера S. Такая задача (то есть проектируемый трал следует считать глубоководным) ставится при наличии условия $\frac{Y}{S} \geq \frac{1}{2}$. Рабочая длина ваера, используемая при буксировке трала, зависит от канатоемкости ваерных барабанов траловой лебедки, установленной на промысловом судне данного типа. Поэтому исходными данными при проектировании глубоководного трала, в отличие от рассмотренных выше случаев, являются технические характеристики траловой лебедки и заданная глубина траления.

Особый подход к определению возможных значений проектных характеристик глубоководного трала связан с тем, что искомые значения должны обеспечивать заданный горизонт хода орудия при ограниченной длине ваеров, которой располагают лебедки многих находящихся в эксплуатации траулеров. Это обстоятельство делает необходимым выделение проектирования глубоководного трала в особый вариант проектирования [38].

Особенность излагаемых ниже методов оптимизации заключается в том, что, в отличие от рассмотренных выше вариантов, при проектировании глубоководного трала искомыми независимыми переменными являются горизонтальная T_{0x} и вертикальная T_{0y} составляющие усилия в ваере в точке его крепления к траловой доске и скорость буксировки трала v. Вместе с тем искомые проектные характеристики трала во всех рассматриваемых вариантах связаны между собой в том смысле, что если решением оптими-

зационной задачи установлены значения линейного размера l и скорости траления v, то по их значениям могут быть определены (с учетом заданных параметров) величины и направления сил T_{0x} и T_{0y} и наоборот.

Связь полупериметра устья трала l с силами T_{0x} и T_{0y} имеет вид:

$$l = \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi}\left(\frac{T_{0x}}{v^2} - C \cdot T_{oy}\right)}, \tag{109}$$

где k_1 – размерный коэффициент сопротивления, численно равный

$$k_1 = \frac{c_x \cdot \rho_в}{2}; \tag{110}$$

$\rho_в$ – плотность воды;

C – коэффициент, значения которого определяются выражениями:

• для разноглубинного трала

$$C = \frac{k_3 + k_2 \cdot \dfrac{F_{гу}}{F_д}}{\gamma_д \cdot t_д + \gamma_{гу} \cdot t_{гу} \cdot \dfrac{F_{гу}}{F_д}}; \tag{111}$$

• для донного трала

$$C = \frac{k_3 + k_4 \cdot \dfrac{F_к}{F_д}}{(1 - k_5) \cdot \gamma_д \cdot t_д}; \tag{112}$$

k_2, k_3 – размерные (кг/м^3) коэффициенты сопротивления грузауглубителя и доски;

k_4 – размерный коэффициент, вычисляемый по формуле

$$k_4 = \frac{c_{xг} \cdot \rho_г}{2}; \tag{113}$$

$c_{xг}$ – безразмерный грунтодинамический коэффициент сопротивления донной траловой доски;

$\rho_г$ – плотность грунта;

$F_{гу}$, $F_д$ – площади отнесения соответственно груза-углубителя и распорной доски;

$F_к$ – площадь киля донной доски, находящейся во взаимодействии с грунтом.

Приведенная связь в форме выражения (57) между промежуточной переменной l и искомыми оптимизируемыми переменными T_{0x} и T_{0y} позволяет использовать целевые функции (29), (42), (46), (52) и для решения задачи оптимизации проектных характеристик глубоководного трала (разноглубинного и донного).

5.3.2. Методы решения задач оптимизации проектных характеристик глубоководных тралов

Полный перебор вариантов проекта

Для поиска оптимального варианта сочетания проектных характеристик глубоководного трала по критериям q и ω следует использовать изложенные выше алгоритмы для разноглубинного (если глубоководный трал будет использоваться в пелагиали) или донного трала (если глубоководный трал будет использоваться на грунте). Единственной дополнительной операцией является замена в целевых функциях (48) для разноглубинного трала или (100) для донного промежуточной переменной l ее значением в соответствии с зависимостью (109).

Пример 5 решения задачи оптимизации проектных характеристик глубоководного трала на основе полного перебора допустимых вариантов по критерию ω.

Задание: найти по критерию w оптимальный вариант сочетания значений характеристик разноглубинного глубоководного трала путем полного перебора допустимых вариантов проекта. Предварительно сформировано 10 допустимых вариантов проекта глубоководного трала для различных типов судов (РТМС, РТМА, БМРТ, РТМТ), которые обеспечивают возможность проведения тралений на глубине 2000 м.

Исходные данные.

Характеристики объекта лова:

скорость движения рыб $V_p := 1{,}3 \cdot \frac{m}{s}$

$$V_{kp} := 1{,}5 \cdot \frac{m}{s}$$

критическая скорость траления

максимальная дальность реакции рыбы на трал и его детали

$r_{max} := 6 \cdot m$

минимальная дальность реакции рыбы на трал и его детали

$r_{min} := 2 \cdot m$

Коэффициенты для расчета характеристик проектируемого трала:

$k_1 := 20 \cdot \frac{kg}{m^3}$ $\xi := 0{,}2$ $C := 0{,}1 \cdot \frac{s^2}{m^2}$

коэффициент сопротивления груза-углубителя $k_2 := 560 \cdot \frac{kg}{m^3}$

коэффициент сопротивления траловой доски $k_3 := 300 \cdot \frac{kg}{m^3}$

Допустимые варианты проекта глубоководного разноглубинного трала:

скорость траления $v := \begin{pmatrix} 2.39 \\ 2.40 \\ 1.38 \\ 1.48 \\ 2.24 \\ 2.35 \\ 2.41 \\ 1.34 \\ 1.46 \\ 1.55 \end{pmatrix} \cdot \frac{m}{s}$

горизонтальная составляющая усилия в нижней точке ваера

$$T_{0x} := \begin{pmatrix} 79620 \\ 94620 \\ 90520 \\ 91530 \\ 55660 \\ 89610 \\ 94620 \\ 69420 \\ 97610 \\ 97610 \end{pmatrix} \cdot N$$

вертикальная составляющая усилия в нижней точке ваера

$$T_{0y} := \begin{pmatrix} 7808 \\ 8445 \\ 9355 \\ 9301 \\ 6143 \\ 8154 \\ 8445 \\ 9016 \\ 8712 \\ 8712 \end{pmatrix} \cdot N$$

Решение.

Для допустимых вариантов проекта находим значение полупериметра устья проектируемого трала

$$l := \left[\overrightarrow{\sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v^2} - C \cdot T_{0y} \right)}} \right]$$

$l =$

	0
0	75.637
1	82.311
2	142.335
3	133.281
4	67.498
5	81.856
6	81.951
7	128.13
8	139.752
9	131.475

m

Для допустимых вариантов проекта находим значение площади устья проектируемого трала

$$F_y := \overrightarrow{\left(l^2 \cdot \xi\right)} \qquad F_y =$$

	0
0	$1.316 \cdot 10^3$
1	$1.558 \cdot 10^3$
2	$4.66 \cdot 10^3$
3	$4.086 \cdot 10^3$
4	$1.048 \cdot 10^3$
5	$1.541 \cdot 10^3$
6	$1.545 \cdot 10^3$
7	$3.776 \cdot 10^3$
8	$4.492 \cdot 10^3$
9	$3.976 \cdot 10^3$

m^2

В качестве базового варианта примем последний вариант из числа приведенных с характеристиками

$$v_0 := 1{,}55 \cdot \frac{m}{s} \quad l_0 := 131{,}475 \cdot m \quad F_{y0} := 3976 \cdot m^2$$

Проводим расчет параметров базового варианта

$$\Delta F_0 := l_0 \cdot \left(r_{max} + r_{min}\right) - \frac{4}{3} \cdot \left(r_{max}^2 + r_{max} \cdot r_{min} + r_{min}^2\right)$$

$\Delta F_0 = 982{,}467\ m^2$

$$n_0 := \frac{\Delta F_0}{F_{y0}} \qquad n_0 = 0{,}247$$

Характеристики анализируемых вариантов

$$l := \begin{pmatrix} 75.637 \\ 82.311 \\ 142.335 \\ 133.281 \\ 67.498 \\ 81.856 \\ 81.951 \\ 128.13 \\ 139.752 \end{pmatrix} \cdot m \qquad y := \begin{pmatrix} 2.39 \\ 2.40 \\ 1.38 \\ 1.48 \\ 2.24 \\ 2.35 \\ 2.41 \\ 1.34 \\ 1.46 \end{pmatrix} \cdot \frac{m}{s} \qquad F_y := \begin{pmatrix} 1316 \\ 1558 \\ 4660 \\ 4086 \\ 1048 \\ 1541 \\ 1545 \\ 3776 \\ 4492 \end{pmatrix} \cdot m^2$$

Проводим расчет параметров анализируемых вариантов

$$\Delta F := \overrightarrow{\left[l \cdot \left(r_{max} + r_{min} \right) - \frac{4}{3} \cdot \left(r_{max}^{\ 2} + r_{max} \cdot r_{min} + r_{min}^{\ 2} \right) \right]}$$

$$\Delta F = \begin{pmatrix} 535.763 \\ 589.155 \\ 1.069 \times 10^3 \\ 996.915 \\ 470.651 \\ 585.515 \\ 586.275 \\ 955.707 \\ 1.049 \times 10^3 \end{pmatrix} m^2 \qquad n := \overrightarrow{\left(\frac{\Delta F}{F_y} \right)} \qquad n = \begin{pmatrix} 0.407 \\ 0.378 \\ 0.229 \\ 0.244 \\ 0.449 \\ 0.38 \\ 0.379 \\ 0.253 \\ 0.233 \end{pmatrix}$$

$$\Delta v := \overrightarrow{\left(v - v_0 \right)} \Delta v = \begin{pmatrix} 0.84 \\ 0.85 \\ -0.17 \\ -0.07 \\ 0.69 \\ 0.8 \\ 0.86 \\ -0.21 \\ -0.09 \end{pmatrix} \frac{m}{s} \qquad \Delta n := \overrightarrow{\left(n - n_0 \right)} \Delta n = \begin{pmatrix} 0.16 \\ 0.131 \\ -0.018 \\ -3.116 \times 10^{-3} \\ 0.202 \\ 0.133 \\ 0.132 \\ 6.001 \times 10^{-3} \\ -0.014 \end{pmatrix}$$

Вычисляем значения критерия оптимизации для анализируемых вариантов

$$\omega := \overrightarrow{\left[\left(\frac{n_0}{v_0}\cdot\frac{\Delta v}{v} - \frac{\Delta n}{v}\right)\cdot E\cdot\xi\cdot l^2\cdot v\right]} \qquad \omega = \begin{pmatrix} -34.347 \\ 6.946 \\ -44.152 \\ -32.861 \\ -96.4 \\ -8.204 \\ 7.312 \\ -149.072 \\ -3.163 \end{pmatrix} \frac{m^3}{s}$$

Как следует из результатов расчетов, максимальное значение критерия оптимизации w = 6,946 м^3/с соответствует варианту с характеристиками:

Ответ:

$\omega_{max} := 6{,}946 \cdot \frac{m^3}{s}$ $\quad l_{opt} := 82{,}3 \cdot m$ $\quad v_{opt} := 2{,}4 \cdot \frac{m}{s}$

$T_{0xopt} := 94620 \cdot N$ $\quad T_{0yopt} := 8445 \cdot N$

Метод ветвей и границ

Для ветвления могут использоваться численные значения искомых проектных характеристик сил T_{0x} и T_{0y}.

Остановимся на решении задач оптимизации проектных характеристик v, T_{0x} и T_{0y} разноглубинного глубоководного трала.

Если в качестве критерия оптимизации принята величина q и выполняется условие $v_м \le v_p$, то для получения целевой функции необходимо во второе выражение (45) взамен промежуточной переменной l подставить ее значение в соответствии с равенством (108). В результате получим:

$$q = \rho\cdot\left[\frac{2}{k_1}\cdot\left(\frac{T_{0x}}{v} - C\cdot v\cdot T_{0y}\right) - \left(r_{max} + r_{min}\right)\cdot\sqrt{\frac{2}{k_1\cdot\xi}\cdot\left(T_{0x} - C\cdot v\cdot T_{0y}\right)} + \right.$$
$$\left. + \frac{4}{3}\cdot v\cdot\left(r_{max}^2 + r_{max}\cdot r_{min} + r_{min}^2\right)\right]. \quad (114)$$

С целью получения правил для оценки верхних границ целевой функции (114) выполним ее исследование, используя условия (71). Тогда имеем:

$$\frac{\partial q}{\partial T_{0x}} = \frac{2}{k_1 \cdot v} - \frac{r_{\max} + r_{\min}}{2 \cdot k_1 \cdot \xi \cdot \left(T_{0x} - C \cdot v^2 \cdot T_{0y}\right)} > 0. \qquad (115)$$

Неравенство (115) после несложных преобразований приводится к виду:

$$T_{0x} > \left[\frac{k_1 \cdot \left(r_{\max} + r_{\min}\right)^2}{8 \cdot \xi} + C \cdot T_{0y} \right] \cdot v^2. \qquad (116)$$

Таким образом, при выполнении условия (116) целевая функция (114) монотонно возрастает с увеличением значения переменной T_{0x}.

Далее

$$\frac{\partial q}{\partial T_{0y}} = \frac{\left(r_{\max} + r_{\min}\right) \cdot v}{\sqrt{2 \cdot k_1 \cdot \xi \cdot \left(T_{0x} - C \cdot v^2 \cdot T_{0y}\right)}} - \frac{2}{k_1} > 0. \qquad (117)$$

Неравенство (116) после преобразований может быть представлено в виде:

$$T_{0x} < \left[\frac{k_1 \cdot \left(r_{\max} + r_{\min}\right)^2}{8 \cdot \xi} + C \cdot T_{0y} \right] \cdot v^2. \qquad (118)$$

Очевидно, что неравенства (116) и (118) исключают друг друга. Поэтому может быть выполнено лишь одно из них. Если выполняется условие (116), то целевая функция (114) будет монотонно возрастать с уменьшением значения T_{0y}.

И, наконец,

$$\frac{\partial q}{\partial v} = \frac{\left(r_{\max} + r_{\min}\right) \cdot C \cdot v \cdot T_{0y}}{\sqrt{2 \cdot k_1 \cdot \xi \cdot \left(T_{0x} - C \cdot v^2 \cdot T_{0y}\right)}} - \frac{2}{3} \cdot \left(r_{\max}^2 + r_{\max} \cdot r_{\min} + r_{\min}^2\right) - \qquad (119)$$

$$- \frac{1}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v^2} + C \cdot T_{0y} \right) > 0.$$

Это неравенство будет выполняться автоматически, если выполняется более простое условие:

$$\frac{\left(r_{\max}+r_{\min}\right)\cdot C\cdot v\cdot T_{0y}}{\sqrt{2\cdot k_1\cdot\xi\cdot\left(T_{0x}-C\cdot v^2\cdot T_{0y}\right)}}>\frac{1}{k_1}\cdot\left(\frac{T_{0x}}{v^2}+C\cdot T_{0y}\right). \quad (120)$$

Неравенство (120) после несложных преобразований приводится к виду:

$$\frac{\left(\frac{T_{0x}}{v^2}+C\cdot T_{0y}\right)\cdot\sqrt{\frac{2\cdot\xi}{k_1}\cdot\left(\frac{T_{0x}}{v^2}-C\cdot T_{0y}\right)}}{\left(r_{\max}+r_{\min}\right)\cdot C\cdot T_{0y}}<1. \quad (121)$$

Условие (121) в большинстве случаев невыполнимо, поэтому следует взять обратное ему:

$$\frac{\left(\frac{T_{0x}}{v^2}+C\cdot T_{0y}\right)\cdot\sqrt{\frac{2\cdot\xi}{k_1}\cdot\left(\frac{T_{0x}}{v^2}-C\cdot T_{0y}\right)}}{\left(r_{\max}+r_{\min}\right)\cdot C\cdot T_{0y}}>1. \quad (122)$$

При выполнении условия (122) целевая функция (114) будет монотонно возрастать с уменьшением значения переменной v.

Таким образом, получаем следующее правило для вычисления оценки верхней границы ς критерия оптимизации q на некотором множестве вариантов проекта глубоководного трала:

$$\varsigma(X)=F\left(T_{0x}^{\max},T_{0y}^{\min},v^{\min}\right). \quad (123)$$

При этом должны выполняться условия (116) и (122).

Теперь рассмотрим случай, когда $v_м > v_р$. Для получения целевой функции, как и ранее, подставим значение промежуточной переменной l в первое выражение (45) в соответствии с равенством (109). В результате получим:

$$q = \rho \cdot \left[\frac{2}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v} - C \cdot v \cdot T_{0y} \right) - v_p \cdot \left(r_{\max} + r_{\min} \right) \cdot \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v^2} - C \cdot T_{0e} \right)} + \right.$$
$$\left. + \frac{4}{3} \cdot v \cdot \left(r_{\max}^2 + r_{\max} \cdot r_{\min} + r_{\min}^2 \right) \right] \cdot \quad (124)$$

Для этих целевых функций имеем:

$$\frac{\partial q}{\partial T_{0x}} = \frac{2}{k_1} - \frac{v_p \cdot \left(r_{\max} + r_{\min} \right)}{v \cdot \sqrt{2 \cdot k_1 \cdot \xi \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v^2} - C \cdot T_{0y} \right)}} > 0. \quad (125)$$

После несложных преобразований вместо неравенства (124) получим:

$$T_{0x} > \left[\frac{k_1 \cdot \left(r_{\max} + r_{\min} \right)^2}{8 \cdot \xi} \cdot v_p^2 + C \cdot T_{0y} \cdot v^2 \right]. \quad (126)$$

При выполнении условия (126) целевая функция (124) будет монотонно возрастать с увеличением значения переменной T_{0x}.

Далее

$$\frac{\partial q}{\partial T_{0y}} = \frac{\left(r_{\max} + r_{\min} \right) \cdot v_p}{\sqrt{2 \cdot k_1 \cdot \xi \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v^2} - C \cdot T_{0y} \right)}} - \frac{2 \cdot v}{k_1} > 0. \quad (127)$$

Из неравенства (127) следует после преобразований:

$$T_{0x} < \left[\frac{k_1 \cdot \left(r_{\max} + r_{\min} \right)^2}{8 \cdot \xi} + C \cdot T_{0y} \cdot v^2 \right]. \quad (128)$$

Поскольку неравенства (126) и (128) противоречат друг другу, то последнее отбрасывается. Тогда при выполнении условия (126)

целевая функция (124) будет монотонно возрастать с уменьшением переменной T_{0y}.

И, наконец,

$$\frac{\partial q}{\partial v} = \frac{\left(r_{\max} + r_{\min}\right) \cdot v_p \cdot T_{0x}}{v^3 \cdot \sqrt{2 \cdot k_1 \cdot \xi \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v^2} - C \cdot T_{0y}\right)}} - \frac{1}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v^2} + C \cdot T_{0y}\right) > 0. \quad (129)$$

Неравенство (129) после преобразований принимает вид:

$$\frac{\left(T_{0x} + C \cdot T_{0y} \cdot v^2\right) \cdot \sqrt{2 \cdot k_1 \cdot \xi \cdot \left(T_{0x} - C \cdot T_{0y} \cdot v^2\right)}}{v_p \cdot k_1 \cdot \left(r_{\max} + r_{\min}\right) \cdot T_{0x}} < 1. \quad (130)$$

Поскольку условие (130) в большинстве случаев невыполнимо, следует принять прямо противоположное:

$$\frac{\left(T_{0x} + C \cdot T_{0y} \cdot v^2\right) \cdot \sqrt{2 \cdot k_1 \cdot \xi \cdot \left(T_{0x} - C \cdot T_{0y} \cdot v^2\right)}}{v_p \cdot \left(r_{\max} + r_{\min}\right) \cdot T_{0x}} > 1. \quad (131)$$

Тогда при выполнении условия (131) целевая функция будет монотонно возрастать с уменьшением значения переменной v.

Таким образом, установлено, что для оценки верхней границы целевой функции (124) на множестве вариантов проекта глубоководного разноглубинного трала, как и в предыдущем случае, следует использовать правило (123). При этом должны выполняться условия (126) и (131).

Если в качестве критерия оптимизации при проектировании глубоководного разноглубинного трала используется величина ω, то для получения целевой функции подставим значение промежуточной переменной l в соответствии с формулой (109) в выражение (59). Получим:

$$\omega = E \cdot \left[\begin{array}{l} 2 \cdot \frac{n_0}{v_0} \cdot \frac{1}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v} - C \cdot T_{0y} \cdot v\right) - \\ -\left(r_{\max} + r_{\min}\right) \cdot \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v^2} - C \cdot T_{0y}\right)} + \frac{4}{3} \cdot \left(r_{\max}^2 + r_{\max} \cdot r_{\min} + r_{\min}^2\right) \end{array} \right]. \quad (132)$$

Для этой целевой функции имеем:

$$\frac{\partial \omega}{\partial T_{0x}} = \frac{n_0}{v_0} \cdot \frac{2}{k_1} - \frac{r_{\max} + r_{\min}}{v \cdot \sqrt{2 \cdot k_1 \cdot \xi \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v^2} - C \cdot T_{0y} \right)}} > 0. \quad (133)$$

Из неравенства (133) после несложных преобразований получаем:

$$\frac{n_0}{v_0} > \frac{r_{\max} + r_{\min}}{\sqrt{\frac{8 \cdot \xi}{k_1} \cdot \left(T_{0x} - C \cdot T_{0y} \cdot v^2 \right)}}. \quad (134)$$

Следовательно, если характеристики базового варианта отвечают условию (134), то целевая функция (132) будет монотонно возрастать с увеличением переменной T_{0x}.

Далее

$$\frac{\partial \omega}{\partial T_{0y}} = \frac{n_0}{v_0} \cdot \frac{2 \cdot v}{k_1} - \frac{r_{\max} + r_{\min}}{\sqrt{2 \cdot k_1 \cdot \xi \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v^2} - C \cdot T_{0y} \right)}} > 0. \quad (135)$$

Из этого условия получаем:

$$\frac{n_0}{v_0} < \frac{r_{\max} + r_{\min}}{\sqrt{\frac{8 \cdot \xi}{k_1} \cdot \left(T_{0x} - C \cdot T_{0y} \cdot v^2 \right)}}. \quad (136)$$

Поскольку неравенство (136) прямо противоположно неравенству (134), то примем последнее. При его выполнении целевая функция (132) будет монотонно возрастать с уменьшением значения переменной T_{0y}.

И, наконец,

$$\frac{\partial \omega}{\partial v} = \frac{\left(r_{\max} + r_{\min}\right) \cdot T_{0x}}{v^3 \cdot \sqrt{2 \cdot k_1 \cdot \xi \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v^2} - C \cdot T_{0y}\right)}} - \frac{n_0}{v_0} \cdot \frac{1}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x}}{v^2} + C \cdot T_{0y}\right) > 0. \quad (137)$$

Из неравенства (137) получаем:

$$\frac{n_0}{v_0} < \frac{\left(r_{\max} + r_{\backslash \min}\right) \cdot T_{0x}}{\left(T_{0x} + C \cdot T_{0y} \cdot v^2\right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \xi}{k_1} \cdot \left(T_{0x} - C \cdot T_{0y} \cdot v^2\right)}}. \quad (138)$$

Очевидно, что неравенство (138) не может быть выполнено совместно с неравенством (134). Поэтому вместо условия (138) примем прямо ему противоположное:

$$\frac{n_0}{v_0} > \frac{\left(r_{\max} + r_{\backslash \min}\right) \cdot T_{0x}}{\left(T_{0x} + C \cdot T_{0y} \cdot v^2\right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \xi}{k_1} \cdot \left(T_{0x} - C \cdot T_{0y} \cdot v^2\right)}}. \quad (139)$$

В этом случае целевая функция (132) будет монотонно возрастать с уменьшением значения переменной *v*.

Таким образом, и в рассматриваемом случае для оценки верхней границы целевой функции на множестве вариантов проекта разноглубинного глубоководного трала следует использовать правило (123). При этом необходимо выбрать базовый вариант таким образом, чтобы его характеристики отвечали условиям (134) и (139).

Назначение базового варианта проекта, характеристики которого отвечали бы условиям (134) и (139), возможно во всех без исключения случаях. Поэтому наиболее целесообразной сферой применения метода ветвей и границ являются задачи оптимизации проектных характеристик разноглубинного трала по критерию ω.

Алгоритмы поиска оптимального варианта проекта разноглубинного глубоководного трала методом ветвей и границ имеют некоторые различия в зависимости от принятого критерия

оптимизации. ***Если критерием оптимизации принята расчетная величина улова q*** или $\boldsymbol{M_q}$, то алгоритм включает в себя вычислительные операции, аналогичные первым трем пунктам изложенного выше алгоритма для разноглубинного трала. Пункт 4, когда искомыми переменными являются v, T_{0x} и T_{0y}, включает: для каждого подмножества $X^{(i)}$ проверяется выполнение условия

$$v^{\min} > v_p. \tag{140}$$

Подмножеству, для которого условие (140) справедливо, соответствует целевая функция (124), и для которого оно не выполняется − функция (114).

5. Для каждого выделенного подмножества проверяется выполнение:

- условий (116) и (122) при проектировании глубоководного трала, если $v^{\min} > v_p$;
- условий (126) и (130) при проектировании глубоководного трала и выполнении условия (140).

В условии (123) следует принять

$$l = l^{(min)},$$

а в условиях (116), (122), (126) и (131)

$$T_{0x} = T_{0x}{}^{(\max)} \quad T_{0y} = T_{0y}{}^{(\min)} \quad v = v^{(\min)}.$$

Варианты подмножеств, для которых указанные условия не выполняются, должны быть исключены из анализа.

Все дальнейшие вычислительные операции не отличаются от изложенных выше для оптимизации характеристик разноглубинного трала.

Рассмотрим пример решения задачи оптимизации проектных характеристик глубоководного трала методом ветвей и границ.

Пример 6 решения задачи оптимизации проектных характеристик глубоководного разноглубинного трала методом ветвей и границ по критерию q.

Задание:

при проектировании разноглубинного глубоководного трала сформировано 27 допустимых вариантов проекта. Используя метод ветвей и границ, найти оптимальный вариант проекта, максимизирующий расчетную величину улова *q* в единицу времени траления.

Исходные данные.

Характеристики объекта лова:

плотность скопления рыб $\rho := 0{,}001 \cdot \frac{kg}{m^3}$

скорость движения рыб $V_p := 1{,}5 \cdot \frac{m}{s}$

критическая скорость траления $V_{kp} := 1{,}1 \cdot \frac{m}{s}$

максимальная дальность реакции рыбы на трал и его детали

$r_{max} := 6 \cdot m$

минимальная дальность реакции рыбы на трал и его детали

$r_{min} := 2 \cdot m$

Характеристики вариантов проекта:

значения коэффициентов, необходимых для проведения расчетов

$\xi := 0{,}1 \quad k_1 := 20 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad k_2 := 560 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad k_3 := 300 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad C := 0{,}09 \cdot \frac{s^2}{m^2}$

значения скорости траления, горизонтальной и вертикальной составляющих усилия в нижней точке ваера приведены в форме указанных ниже матриц.

$$v := \begin{pmatrix} 2.39 \\ 2.40 \\ 1.38 \\ 1.48 \\ 2.24 \\ 2.35 \\ 2.41 \\ 1.34 \\ 1.46 \\ 1.55 \\ 1.5 \\ 1.4 \\ 2.15 \\ 2.38 \\ 2.40 \\ 2.43 \\ 1.20 \\ 1.50 \\ 1.49 \\ 1.50 \\ 2.12 \\ 2.43 \\ 2.48 \\ 2.50 \\ 1.35 \\ 2.15 \\ 1.20 \end{pmatrix} \cdot \frac{m}{s} \qquad T_{0x} := \begin{pmatrix} 79620 \\ 94620 \\ 90520 \\ 91530 \\ 55660 \\ 89610 \\ 94620 \\ 69420 \\ 97610 \\ 97610 \\ 129650 \\ 134630 \\ 49690 \\ 90610 \\ 93590 \\ 129650 \\ 54680 \\ 97610 \\ 99620 \\ 149650 \\ 69640 \\ 95910 \\ 98820 \\ 149640 \\ 84630 \\ 69540 \\ 87620 \end{pmatrix} \cdot N \qquad T_{0y} := \begin{pmatrix} 7808 \\ 8445 \\ 9355 \\ 9301 \\ 6143 \\ 8154 \\ 8445 \\ 9016 \\ 8712 \\ 8712 \\ 9516 \\ 9882 \\ 5575 \\ 8408 \\ 8845 \\ 9516 \\ 5940 \\ 8712 \\ 8720 \\ 10200 \\ 7077 \\ 8561 \\ 8650 \\ 10470 \\ 7854 \\ 7077 \\ 8131 \end{pmatrix} \cdot N$$

Решение

Разобьем множество вариантов проекта трала на три подмножества. В качестве признака, по которому осуществлено разбиение, примем следующие диапазоны значений скорости траления:

подмножество X_{11} диапазон скоростей v =1,2–1,5 m/s

содержит следующие варианты с характеристиками

диапазон скоростей v = 1,51–2,0 m/s включает один вариант с характеристиками:

$$v_{11} := \begin{pmatrix} 1.38 \\ 1.48 \\ 1.34 \\ 1.46 \\ 1.50 \\ 1.40 \\ 1.20 \\ 1.50 \\ 1.49 \\ 1.50 \\ 1.35 \\ 1.20 \end{pmatrix} \cdot \frac{m}{s} \quad T_{0x11} := \begin{pmatrix} 90520 \\ 91530 \\ 69420 \\ 97610 \\ 129650 \\ 134630 \\ 54680 \\ 97610 \\ 99620 \\ 149650 \\ 84630 \\ 87620 \end{pmatrix} \cdot N \quad T_{0y11} := \begin{pmatrix} 9355 \\ 9301 \\ 9016 \\ 8712 \\ 9516 \\ 9882 \\ 5940 \\ 8712 \\ 8720 \\ 10200 \\ 7854 \\ 8131 \end{pmatrix} \cdot N$$

подмножество X_{12} диапазон скоростей v = 2,1–2,5 m/s

$$v_{12} := 1{,}55 \cdot \frac{m}{s} \qquad T_{0x12} := 97610 \cdot N \qquad T_{0x12} := 97610 \cdot N$$

подмножество X_{13} содержит варианты с характеристиками

$$v_{13} := \begin{pmatrix} 2.39 \\ 2.4 \\ 2.24 \\ 2.35 \\ 2.41 \\ 2.15 \\ 2.38 \\ 2.40 \\ 2.43 \\ 2.12 \\ 2.43 \\ 2.48 \\ 2.5 \\ 2.15 \end{pmatrix} \cdot \frac{m}{s} \quad T_{0x13} := \begin{pmatrix} 79620 \\ 94620 \\ 55660 \\ 89610 \\ 94620 \\ 49690 \\ 90610 \\ 93590 \\ 129650 \\ 69640 \\ 95910 \\ 98820 \\ 149640 \\ 96540 \end{pmatrix} \cdot N \quad T_{0y13} := \begin{pmatrix} 7808 \\ 8445 \\ 6143 \\ 8154 \\ 8445 \\ 5575 \\ 8408 \\ 8845 \\ 9616 \\ 7077 \\ 8561 \\ 8650 \\ 10470 \\ 7077 \end{pmatrix}$$

Проверка допустимости вариантов первого подмножества X_{11}, äëÿ êîòîðîãî $v_{min} < v_p$

Для первого подмножества получаем:

$T_{0x11max} := 149650 \cdot N \quad T_{0y11min} := 5940 \cdot N \quad v_{11min} := 1{,}2 \cdot \frac{m}{s}$

$$\frac{\left(\frac{T_{0x11max}}{v_{11min}^{\,2}} + C \cdot T_{0y11min}\right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \xi}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x11max}}{v_{11min}^{\,2}} - C \cdot T_{0y11min}\right)}}{(r_{max} + r_{min}) \cdot C \cdot T_{0y11min}} = 860{,}303$$

$$\left[\frac{k_1 \cdot (r_{max} + r_{min})^2}{8 \cdot \xi} + C \cdot T_{0y11min}\right] \cdot v_{11min}^{\,2} = 2{,}69 \cdot 10^3\ N$$

Условия допустимости выполняются.

Проверка допустимости вариантов второго подмножества X_{12}, äëÿ êîòîðîãî $v_{min} < v_p$

Для второго подмножества получаем:

$T_{0x12max} := 97610 \cdot N \quad T_{0y12min} := 8712 \cdot N \quad v_{12min} := 1{,}55 \cdot \frac{m}{s}$

$$\frac{\left[\left(T_{0x12max}\right)+C\cdot T_{0y12min}\cdot v_{12min}^{2}\right]\cdot\sqrt{\frac{2\cdot\xi}{k_1}\cdot\left[\left(T_{0x12max}\right)-C\cdot T_{0y12min}\cdot v_{12min}^{2}\right]}}{\left(r_{max}+r_{min}\right)\cdot v_p\cdot T_{0x12max}}=2{,}879$$

$$\frac{k_1\cdot\left(r_{max}+r_{min}\right)^2}{8\cdot\xi}\cdot v_p^{\,2}+C\cdot T_{0y12min}\cdot v_{12min}^{\,2}=4{,}884\times10^{3}\,N$$

Условия допустимости выполняются.

Для третьего подмножества X_{13}

$v_{min} < v_p \qquad T_{0x13max} := 149640\cdot N \qquad T_{0y13min} := 5575\cdot N$

$$v_{13min} := 2{,}12\cdot\frac{m}{s}$$

$$\frac{k_1\cdot\left(r_{max}+r_{min}\right)^2}{8\cdot\xi}\cdot v_p^{\,2}+C\cdot T_{0y13min}\cdot v_{13min}^{\,2}=5{,}255\times10^{3}\,N$$

$$\frac{\left[\left(T_{0x13max}\right)+C\cdot T_{0y13min}\cdot v_{13min}^{2}\right]\cdot\sqrt{\frac{2\cdot\xi}{k_1}\cdot\left[\left(T_{0x13max}\right)-C\cdot T_{0y13min}\cdot v_{13min}^{2}\right]}}{\left(r_{max}+r_{min}\right)\cdot v_p\cdot T_{0x13max}}=3{,}557$$

Для третьего подмножества условия допустимости также выполняются.

Для подмножества X_{11}

оценка верхней границы критерия оптимизации q

$$q_{11} := \rho\cdot\left[\begin{array}{l}\frac{2}{k_1}\cdot\left(\frac{T_{0x11max}}{v_{11min}}-C\cdot v_{11min}\cdot T_{0y11min}\right)-\left(r_{max}+r_{min}\right)\cdot\ \cdots\\ +\sqrt{\frac{2}{k_1\cdot\xi}\cdot\left(T_{0x11max}-C\cdot v_{11min}^{\,2}\cdot T_{0y11min}\right)}+\frac{4}{3}\cdot v_{11min}\ \cdots\\ +\blacksquare\cdot\left(r_{max}^{\,2}+r_{max}\cdot r_{min}+r_{min}^{\,2}\right)\end{array}\right]$$

$q_{11} = 9{,}672\ kg/s$

Для подмножества X_{12}

оценка верхней границы критерия оптимизации q

$$q_{12} := \rho \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{2}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x12max}}{v_{12min}} - C \cdot v_{12min} \cdot T_{0y12min} \right) - \left(r_{max} + r_{min} \right) \cdot \quad \cdots \\ + v_p \cdot \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(\frac{T_{0x12max}}{v_{12min}^{\,2}} - C \cdot T_{0y12min} \right)} + \quad \cdots \\ + \frac{4}{3} \cdot v_{12min} \cdot \left(r_{max}^{\,2} + r_{max} \cdot r_{min} + r_{min}^{\,2} \right) \end{array} \right]$$

$$q_{12} = 4{,}097 \ \frac{kg}{s}$$

Для подмножества X_{13}

оценка верхней границы критерия оптимизации q

$$q_{13} := \rho \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{2}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x13max}}{v_{13min}} - C \cdot v_{13min} \cdot T_{0y13min} \right) - \left(r_{max} + r_{min} \right) \cdots \\ + \quad \cdot v_p \cdot \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(\frac{T_{0x13max}}{v_{13min}^{\,2}} - C \cdot T_{0y13min} \right)} + \quad \cdots \\ + \frac{4}{3} \cdot v_{11min} \cdot \left(r_{max}^{\,2} + r_{max} \cdot r_{min} + r_{min}^{\,2} \right) \end{array} \right]$$

$$q_{13} = 5{,}052 \ \frac{kg}{s}$$

Как следует из приведенных результатов расчетов, наиболее перспективным для дальнейшего ветвления является первое подмножество. В качестве признака разбиения по-прежнему примем диапазон скоростей траления.

Получим следующие три новых подмножества второго ветвления.

Подмножество X_{21}

диапазон скоростей v = 1,2–1,30 m/s

$$v_{21} := \begin{pmatrix} 1.2 \\ 1.2 \end{pmatrix} \cdot \frac{m}{s} \quad T_{0x21} := \begin{pmatrix} 54680 \\ 87620 \end{pmatrix} \cdot N \qquad T_{0y21} := \begin{pmatrix} 5970 \\ 8131 \end{pmatrix} \cdot N$$

Подмножество X_{22}

диапазон скоростей v = 1,31–1,40 m/s

$$v_{22} := \begin{pmatrix} 1.38 \\ 1.34 \\ 1.40 \\ 1.35 \end{pmatrix} \cdot \frac{m}{s} \quad T_{0x22} := \begin{pmatrix} 90520 \\ 69420 \\ 134630 \\ 84630 \end{pmatrix} \cdot N \quad T_{0y22} := \begin{pmatrix} 9355 \\ 9016 \\ 9882 \\ 7854 \end{pmatrix} \cdot N$$

Подмножество X_{23}

диапазон скоростей v = 1,41–1,50 m/s

$$v_{23} := \begin{pmatrix} 1.48 \\ 1.46 \\ 1.50 \\ 1.50 \\ 1.49 \\ 1.50 \end{pmatrix} \cdot \frac{m}{s} \quad T_{0x23} := \begin{pmatrix} 91530 \\ 97610 \\ 129650 \\ 97610 \\ 99620 \\ 149650 \end{pmatrix} \cdot N \quad T_{023} := \begin{pmatrix} 9301 \\ 8712 \\ 9516 \\ 8712 \\ 8720 \\ 10200 \end{pmatrix} \cdot N$$

Как и ранее, осуществляем проверку допустимости вариантов на каждом подмножестве и вычисляем верхние границы.

Подмножество X_{21}

$$T_{0x21max} := 87620 \cdot N \quad T_{0y21min} := 5970 \cdot N \quad v_{21min} := 1{,}2 \cdot \frac{m}{s}$$

$$\left[\frac{k_1 \cdot (r_{max} + r_{min})^2}{8 \cdot \xi} + C \cdot T_{0y21min} \right] \cdot v_{21min}^{\ 2} = 2{,}694 \times 10^3 \, N$$

$$\frac{\left(\frac{T_{0x21max}}{v_{21min}^{\ 2}} + C \cdot T_{0y21min} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \xi}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x21max}}{v_{21min}^{\ 2}} - C \cdot T_{0y21min} \right)}}{(r_{max} + r_{min}) \cdot C \cdot T_{0y21min}} = 384{,}182$$

Подмножество X_{22}

$$T_{0x22max} := 134630 \cdot N \quad T_{0y22min} := 7854 \cdot N \quad v_{22min} := 1{,}34 \cdot \frac{m}{s}$$

$$\left[\frac{k_1 \cdot (r_{max} + r_{min})^2}{8 \cdot \xi} + C \cdot T_{0y22min} \right] \cdot v_{22min}^{\ 2} = 3.663 \times 10^3 \, N$$

$$\frac{\left(\frac{T_{0x22max}}{v_{22min}^{2}}+C\cdot T_{0y22min}\right)\cdot\sqrt{\frac{2\cdot\xi}{k_1}\cdot\left(\frac{T_{0x22max}}{v_{22min}^{2}}-C\cdot T_{0y22min}\right)}}{(r_{max}+r_{min})\cdot C\cdot T_{0y22min}}=399{,}562$$

Подмножество X_{23}

$$T_{0x23max}:=149650\cdot N \qquad T_{0y23min}:=8712\cdot N \qquad v_{23min}:=1{,}48\cdot\frac{m}{s}$$

$$\left[\frac{k_1\cdot(r_{max}+r_{min})^2}{8\cdot\xi}+C\cdot T_{0y23min}\right]\cdot v_{23min}^{2}=4.638\times10^{3}\,N$$

$$\frac{\left(\frac{T_{0x23max}}{v_{23min}^{2}}+C\cdot T_{0y23min}\right)\cdot\sqrt{\frac{2\cdot\xi}{k_1}\cdot\left(\frac{T_{0x23max}}{v_{23min}^{2}}-C\cdot T_{0y23min}\right)}}{(r_{max}+r_{min})\cdot C\cdot T_{0y23min}}=313{,}631$$

На всех подмножествах условия допустимости вариантов выполняются.

$$q_{21}:=\rho\cdot\left[\begin{array}{l}\frac{2}{k_1}\cdot\left(\frac{T_{0x21max}}{v_{21min}}-C\cdot v_{21min}\cdot T_{0y21min}\right)-(r_{max}+r_{min})\ \cdots\\ +\ \cdot\sqrt{\frac{2}{k_1\cdot\xi}\cdot\left(T_{0x21max}-C\cdot v_{21min}^{2}\cdot T_{0y21min}\right)}+\ \cdots\\ +\frac{4}{3}\cdot v_{21min}\cdot\left(r_{max}^{2}+r_{max}\cdot r_{min}+r_{min}^{2}\right)\end{array}\right]$$

$$q_{21}=5{,}168\ \frac{kg}{s}$$

$$q_{22}:=\rho\cdot\left[\begin{array}{l}\frac{2}{k_1}\cdot\left(\frac{T_{0x22max}}{v_{22min}}-C\cdot v_{22min}\cdot T_{0y22min}\right)-(r_{max}+r_{min})\ \cdots\\ +\ \cdot\sqrt{\frac{2}{k_1\cdot\xi}\cdot\left(T_{0x22max}-C\cdot v_{22min}^{2}\cdot T_{0y22min}\right)}+\ \cdots\\ +\frac{4}{3}\cdot v_{22min}\cdot\left(r_{max}^{2}+r_{max}\cdot r_{min}+r_{min}^{2}\right)\end{array}\right]$$

$$q_{22} = 7{,}378\ \frac{kg}{s}$$

$$q_{23} := \rho \cdot \left[\frac{2}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x23max}}{v_{23min}} - C \cdot v_{23min} \cdot T_{0y23min} \right) - \left(r_{max} + r_{min} \right) \cdots \right.$$
$$\left. + \cdot \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(T_{0x23max} - C \cdot {v_{23min}}^2 \cdot T_{0y23min} \right)} + \cdots \right.$$
$$\left. + \frac{4}{3} \cdot v_{23min} \cdot \left({r_{max}}^2 + r_{max} \cdot r_{min} + {r_{min}}^2 \right) \right]$$

$$q_{23} = 7{,}289\ \frac{kg}{s}$$

На третьем шаге ветвления второе концевое подмножество имеет наибольшее значение верхней границы. В этой связи разбиваем его на следующие два подмножества.

Подмножество X_{31}

диапазон скоростей v = 1,34–1,35 m/s

$$T_{0x31} := \begin{pmatrix} 69420 \\ 84630 \end{pmatrix} \cdot N \quad T_{0y31} := \begin{pmatrix} 9016 \\ 7854 \end{pmatrix} \cdot N \quad v_{31} := \begin{pmatrix} 1.34 \\ 1.35 \end{pmatrix} \cdot \frac{m}{s}$$

По аналогии с предыдущими расчетами получаем:

$T_{0x31max} := 84630 \cdot N \quad T_{0y31min} := 7854 \cdot N \quad v_{31min} := 1{,}34 \cdot \frac{m}{s}$

$$\left[\frac{k_1 \cdot \left(r_{max} + r_{min} \right)^2}{8 \cdot \xi} + C \cdot T_{0y31min} \right] \cdot {v_{31min}}^2 = 3{,}663 \times 10^3\ N$$

$$\frac{\left(\frac{T_{0x31max}}{{v_{31min}}^2} + C \cdot T_{0y31min} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \xi}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x31max}}{{v_{31min}}^2} - C \cdot T_{0y31min} \right)}}{\left(r_{max} + r_{min} \right) \cdot C \cdot T_{0y31min}} = 199{,}675$$

Подмножество X_{32}

диапазон скоростей v = 1,31–1,40 m/s

$$T_{0x32} := \begin{pmatrix} 90520 \\ 134630 \end{pmatrix} \cdot N \quad T_{0y32} := \begin{pmatrix} 9355 \\ 9882 \end{pmatrix} \cdot N \quad v_{32} := \begin{pmatrix} 1.38 \\ 1.40 \end{pmatrix} \cdot \frac{m}{s}$$

$$T_{0x32max} := 134630 \cdot N \qquad T_{0y32min} := 9355 \cdot N \qquad v_{32min} := 1{,}38 \cdot \frac{m}{s}$$

$$\left[\frac{k_1 \cdot (r_{max} + r_{min})^2}{8 \cdot \xi} + C \cdot T_{0y32min} \right] \cdot v_{32min}^{\ 2} = 4{,}143 \times 10^3 \ N$$

$$\frac{\left(\frac{T_{0x32max}}{v_{32min}^{\ 2}} + C \cdot T_{0y32min} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \xi}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x32max}}{v_{32min}^{\ 2}} - C \cdot T_{0y32min} \right)}}{(r_{max} + r_{min}) \cdot C \cdot T_{0y22min}} = 366{,}254$$

Все варианты допустимы.

$$q_{31} := \rho \cdot \left[\frac{2}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x31max}}{v_{31min}} - C \cdot v_{31min} \cdot T_{0y31min} \right) - (r_{max} + r_{min}) \cdots \right.$$
$$\left. + \cdot \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(T_{0x31max} - C \cdot v_{31min}^{\ 2} \cdot T_{0y31min} \right)} + \cdots \right.$$
$$\left. + \frac{4}{3} \cdot v_{31min} \cdot \left(r_{max}^{\ 2} + r_{max} \cdot r_{min} + r_{min}^{\ 2} \right) \right]$$

$$q_{31} = 4{,}205 \ \frac{kg}{s}$$

$$q_{32} := \rho \cdot \left[\frac{2}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x32max}}{v_{32min}} - C \cdot v_{32min} \cdot T_{0y32min} \right) - (r_{max} + r_{min}) \cdots \right.$$
$$\left. + \cdot \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(T_{0x32max} - C \cdot v_{32min}^{\ 2} \cdot T_{0y32min} \right)} + \cdots \right.$$
$$\left. + \frac{4}{3} \cdot v_{32min} \cdot \left(r_{max}^{\ 2} + r_{max} \cdot r_{min} + r_{min}^{\ 2} \right) \right]$$

$$q_{32} = 7{,}072 \ \frac{kg}{s}$$

На четвертом шаге ветвления подмножество

делим на три следующих подмножества:

Подмножество X_{41}

диапазон скоростей v = 1,50 m/s

$$T_{0x41} := \begin{pmatrix} 129650 \\ 97610 \\ 149650 \end{pmatrix} \cdot N \quad T_{0y21} := \begin{pmatrix} 9516 \\ 8712 \\ 10200 \end{pmatrix} \cdot N \quad v_{41} := \begin{pmatrix} 1.5 \\ 1.5 \\ 1.5 \end{pmatrix} \cdot \frac{m}{s}$$

Подмножество X_{42}

диапазон скоростей v = 1,48–1,49 m/s

$$T_{0x42} := \begin{pmatrix} 91530 \\ 99620 \end{pmatrix} \cdot N \quad T_{0y21} := \begin{pmatrix} 9301 \\ 8720 \end{pmatrix} \cdot N \quad v_{42} := \begin{pmatrix} 1.48 \\ 1.49 \end{pmatrix} \cdot \frac{m}{s}$$

Подмножество X_{43}

скорость v = 1,46 m/s

$$v_{43} := (1{,}46) \cdot \frac{m}{s} \quad T_{0x43} := (97610) \cdot N \qquad T_{0y43} := (8712) \cdot N$$

Подмножества отвечают условиям ограничений.

Для этих подмножеств получаем следующие характеристики:

$$T_{0x41max} := 149650 \cdot N \qquad T_{0y41min} := 8712 \cdot N \qquad v_{41min} := 1{,}50 \cdot \frac{m}{s}$$

$$T_{0x42max} := 9960 \cdot N \qquad T_{0y42min} := 8720 \cdot N \qquad v_{42min} := 1{,}48 \cdot \frac{m}{s}$$

$$T_{0x43max} := 97610 \cdot N \qquad T_{0y43min} := 8712 \cdot N \qquad v_{43min} := 1{,}46 \cdot \frac{m}{s}$$

Вычисляем значения верхних границ на концевых подмножествах.

$$q_{41} := \rho \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{2}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x41max}}{v_{41min}} - C \cdot v_{41min} \cdot T_{0y41min} \right) - \left(r_{max} + r_{min} \right) \cdots \\ + \cdot \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(T_{0x41max} - C \cdot v_{41min}^{\,2} \cdot T_{0y41min} \right)} + \cdots \\ + \frac{4}{3} \cdot v_{41min} \cdot \left(r_{max}^{\,2} + r_{max} \cdot r_{min} + r_{min}^{\,2} \right) \end{array} \right]$$

$$q_{41} = 7{,}155\ \frac{kg}{s}$$

$$q_{42} := \rho \cdot \left[\frac{2}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x42max}}{v_{42min}} - C \cdot v_{42min} \cdot T_{0y42min} \right) - \left(r_{max} + r_{min} \right) \cdots \right.$$
$$\left. + \cdot \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(T_{0x42max} - C \cdot v_{42min}^{\ 2} \cdot T_{0y42min} \right)} + \cdots \right.$$
$$\left. + \frac{4}{3} \cdot v_{42min} \cdot \left(r_{max}^{\ 2} + r_{max} \cdot r_{min} + r_{min}^{\ 2} \right) \right]$$

$$q_{42} = -3{,}526 \times 10^{-3}\ \frac{kg}{s}$$

$$q_{43} := \rho \cdot \left[\frac{2}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x43max}}{v_{43min}} - C \cdot v_{43min} \cdot T_{0y43min} \right) - \left(r_{max} + r_{min} \right) \cdots \right.$$
$$\left. + \cdot \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(T_{0x43max} - C \cdot v_{43min}^{\ 2} \cdot T_{0y43min} \right)} + \cdots \right.$$
$$\left. + \frac{4}{3} \cdot v_{43min} \cdot \left(r_{max}^{\ 2} + r_{max} \cdot r_{min} + r_{min}^{\ 2} \right) \right]$$

$$q_{43} = 4{,}41\ \frac{kg}{s}$$

На пятом шаге ветвления подмножество X_{41}

разбиваем на три подмножества по значению величины усилия в нижней точке ваера.

Подмножество X_{51} $T_{0x} = 129630N$

$T_{0x51} := (129650) \cdot N$ $T_{0y51} := (9516) \cdot N$ $v_{51} := (1{,}5) \cdot \frac{m}{s}$

Подмножество X_{52} $T_{0x} = 97610N$

$T_{0x52} := (97610) \cdot N$ $T_{0y52} := (8712) \cdot N$ $v_{52} := (1{,}5) \cdot \frac{m}{s}$

Подмножество X_{53} $T_{0x} = 149650N$

$T_{0x53} := (149650) \cdot N$ $T_{0y53} := (10200) \cdot N$ $v_{53} := (1{,}5) \cdot \frac{m}{s}$

Проверка показывает, что все варианты этих подмножеств допустимы.

Вычисляем значения верхних границ на концевых подмножествах.

$$q_{51} := \rho \cdot \left[\frac{2}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x51}}{v_{51}} - C \cdot v_{51} \cdot T_{0y51} \right) - \left(r_{max} + r_{min} \right) \cdots \right.$$
$$\left. + \cdot \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(T_{0x51} - C \cdot {v_{51}}^2 \cdot T_{0y51} \right)} + \cdots \right.$$
$$\left. + \frac{4}{3} \cdot v_{51} \cdot \left({r_{max}}^2 + r_{max} \cdot r_{min} + {r_{min}}^2 \right) \right]$$

$$q_{51} = (6{,}009)\ \frac{kg}{s}$$

$$q_{52} := \rho \cdot \left[\frac{2}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x52}}{v_{52}} - C \cdot v_{52} \cdot T_{0y52} \right) - \left(r_{max} + r_{min} \right) \cdots \right.$$
$$\left. + \cdot \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(T_{0x52} - C \cdot {v_{52}}^2 \cdot T_{0y52} \right)} + \cdots \right.$$
$$\left. + \frac{4}{3} \cdot v_{52} \cdot \left({r_{max}}^2 + r_{max} \cdot r_{min} + {r_{min}}^2 \right) \right]$$

$$q_{52} = (4{,}233)\ \frac{kg}{s}$$

$$q_{53} := \rho \cdot \left[\frac{2}{k_1} \cdot \left(\frac{T_{0x53}}{v_{53}} - C \cdot v_{53} \cdot T_{0y53} \right) - \left(r_{max} + r_{min} \right) \cdots \right.$$
$$\left. + \cdot \sqrt{\frac{2}{k_1 \cdot \xi} \cdot \left(T_{0x53} - C \cdot {v_{53}}^2 \cdot T_{0y53} \right)} + \cdots \right.$$
$$\left. + \frac{4}{3} \cdot v_{53} \cdot \left({r_{max}}^2 + r_{max} \cdot r_{min} + {r_{min}}^2 \right) \right]$$

$$q_{53} = (7{,}137)\ \frac{kg}{s}$$

Поскольку последнее подмножество имеет максимальное значение верхней границы на всех концевых подмножествах и содержит единственный вариант проекта, то он и является оптимальным.

Ответ:

$v_{opt} := (1{,}5) \cdot \frac{m}{s}$ $T_{0xopt} := (149650) \cdot N$ $T_{0yopt} := (10200) \cdot N$

Если критерием оптимизации принята величина эффективного протраленного объема воды ω, то алгоритм решения рассматриваемой задачи включает в себя следующие вычислительные операции:

1. Определяется область допустимых значений характеристики базового варианта $\frac{n_0}{v_0}$, отвечающая условиям:

   ▪ (133) и (138), если искомыми переменными являются составляющие усилия в нижней точке ваера T_{0x}, T_{0y} и скорость траления v. При вычислении значений правых частей этих неравенств следует принять

$$T_{0xi} = T_{0x}^{(\min)};$$
$$T_{0yi} = T_{0y}^{(\min)};$$
$$v_i = v^{(\max)}$$

   на всем анализируемом множестве вариантов проекта.
2. Произвольно назначаются значения характеристик базового варианта $\frac{n_0}{v_0}$, соответствующие найденной допустимой области.
3. Назначается величина скорости траления в базовом варианте v_0. При этом целесообразно принять $v_0 = v^{(\min)}$ на всем анализируемом множестве вариантов проекта.
4. По установленным значениям характеристик $\frac{n_0}{v_0}$ и v_0 определяется величина характеристики n_0 в базовом варианте.
5. Исходное множество вариантов проекта разбивается на произвольное число подмножеств $X^{(i)}$.
6. Для каждого выделенного подмножества $X^{(i)}$ определяется оценка верхней границы критерия оптимизации ω. С этой целью вычисляются значения целевой функции (132) для значений переменных v, T_{0x} и T_{0y}, определяемых по правилу (123).
7. Все остальные операции поиска оптимального варианта проекта не отличаются от указанных выше для решения задач оптимизации по критерию q.

5.4. Метод оптимизации конструктивных характеристик канатно-сетной части трала

5.4.1. Постановка задачи оптимизации конструктивных характеристик канатно-сетной части трала

К конструктивным характеристикам канатно-сетной части тралов относятся шаг ячеи a, диаметр канатов и ниток d, коэффициенты посадки $u_м$, циклы кройки C. Назначение этих характеристик не имеет научного обоснования. Однако если шаг ячеи и диаметр канатов и ниток устанавливаются на основе опыта эксплуатации тралов в соответствующем районе промысла, с учетом особенностей поведения объекта лова и тяги судна, то циклы кройки и посадочные коэффициенты назначаются достаточно произвольно, исходя из имеющихся представлений на этот счет у проектировщика. Между тем указанные характеристики существенно влияют на силу сопротивления канатно-сетной части трала.

Исходя из сказанного, целесообразно поставить задачу поиска таких значений циклов кройки и коэффициентов посадки, при которых сила сопротивления канатно-сетной части примет минимальное значение.

Итак, в рассматриваемой оптимизационной задаче в качестве целевой функции будем использовать известную формулу для расчета силы сопротивления канатно-сетной части трала в виде [38, 44]:

$$R_x = c_x \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot F_н , \qquad (141)$$

где c_x – коэффициент сопротивления канатно-сетной части трала;

$F_н$ – площадь канатов и ниток, образующих канатно-сетную часть трала.

Заметим, что значения линейных размеров канатно-сетной части и скорости траления находились при решении задачи более высокого уровня, связанной с оптимизацией проектных характеристик траловой системы. Соответствующие целевые функции и ограничения для решения таких задач приведены в разделах 5.1 и

5.2. Поэтому величину $F_н$, которая зависит от линейных размеров трала, диаметра канатов и ниток, шага ячеи, будем считать величиной известной. Известны также значения v и ρ.

Коэффициент сопротивления определяется следующим выражением [38]:

$$c_x = 0{,}04 \cdot \left[A(\tau, \xi, \chi) + 110 \cdot e^{-6{,}4 \cdot F_0} \cdot (P - 0{,}02)\right] - 0{,}09, \qquad (142)$$

где 0,04 и 110 – размерные (1/град. и град.) эмпирические коэффициенты;

6,4 и 0,09 – безразмерные эмпирические коэффициенты;

$A(\tau, \xi, \chi)$ – размерный параметр, связывающий безразмерные распорную силу траловой доски τ, подъемную силу оснастки верхней подборы ξ и заглубляющую силу оснастки нижней подборы χ со значением коэффициента сопротивления;

F_0 – сплошность (относительная площадь) канатно-сетной части трала, определяемая как

$$F_0 = \frac{d}{a} \cdot \frac{1}{u_x \cdot \sqrt{1 - u_x^2}}; \qquad (143)$$

P – параметр, определяющий конструктивные характеристики канатно-сетной части трала в виде

$$P = \frac{I \cdot u_x^2}{2 \cdot \pi \cdot (C + 0{,}5)}; \qquad (144)$$

I – число пластей, составляющих канатно-сетную часть трала.

В формулах (143) и (144) значения d, a, u_x и C являются средними взвешенными по площади канатов и ниток канатно-сетной части трала.

После подстановки выражений (143), (144) и (142) в формулу (141) получим целевую функцию в следующем виде:

$$R_x = \left\{ 0{,}04 \cdot \left[A(\tau, \xi, \chi) + 110 \cdot e^{-6{,}4 \cdot \frac{d}{a} \cdot \frac{1}{u_x \cdot \sqrt{1 - u_x^2}}} \cdot \left(\frac{I \cdot u_x^2}{2 \cdot \pi \cdot (C + 0{,}5)} - 0{,}02 \right) \right] - 0{,}09 \right\} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot F_н. \qquad (145)$$

На искомые значения указанных конструктивных характеристик следует наложить следующие ограничения.

Как известно, от значений коэффициента зависят поперечные напряжения $\sigma_м$, стягивающие канатно-сетную оболочку трала [38]. Эта зависимость имеет вид:

$$\sigma_x = \sigma_y \cdot \frac{u_x^2}{\sqrt{1-u_x^2}}, \qquad (146)$$

где σ_y – продольные напряжения в канатно-сетной оболочке, которые можно представить как отношение силы сопротивления канатно-сетной части трала к периметру его устья.

Как следует из выражения (146), поперечные стягивающие напряжения $\sigma_м$ сильно зависят от среднего взвешенного посадочного коэффициента $u_м$. С увеличением стягивающих напряжений σ_x изменяется форма канатно-сетной оболочки трала, прогиб меридиана оболочки увеличивается, что, очевидно, должно затруднять проход рыбам в направлении тралового мешка.

Связь формы канатно-сетной оболочки трала с поперечными напряжениями $\sigma_м$ (или, что одно и то же, с поперечным посадочным коэффициентом u_x) не изучена. Определение такой связи требует проведения соответствующих экспериментальных исследований, в частности – на физических моделях разноглубинных тралов. По результатам таких исследований могут быть установлены максимально допустимые значения поперечного посадочного коэффициента $[u_x]_{доп}$, при которых прогиб меридиана канатно-сетной оболочки трала не будет служить препятствием для прохождения рыб в траловый мешок. Таким образом, на искомые значения среднего взвешенного посадочного коэффициента u_x следует наложить ограничение:

$$u_x \le [u_x]_{доп}. \qquad (147)$$

Следующее ограничение должно быть наложено на область определения функции $R_x = f(u_x, C)$, которое вытекает из следующих соображений.

На уровне решения задач оптимизации траловой системы находятся значения полупериметра устья трала $l_{опт}$ и скорости траления $v_{опт}$, максимизирующие величину улова в единицу времени. Величина раскрытия устья трала и, следовательно, значение полупериметра устья зависят от сил, создаваемых оснасткой трала и силой его сопротивления. Действительно:

$$l = H + L, \tag{148}$$

где H и L – соответственно вертикальное и горизонтальное раскрытия устья трала.

В свою очередь имеем:

$$H = f(\tau, \xi, \chi) \text{ и } L = f(\tau, \xi, \chi). \tag{149}$$

Явные зависимости (148) для разноглубинных тралов получены в работе [49]. Они имеют вид:

$$\begin{aligned} H &= (5{,}495 - 0{,}434 \cdot X_1 + 0{,}649 \cdot X_2 + 0{,}893 \cdot X_3) \cdot \sqrt{F_н}, \\ L &= (7{,}549 + 0{,}304 \cdot X_1 - 0{,}077 \cdot X_2 - 0{,}208 \cdot X_3) \cdot \sqrt{F_н}, \end{aligned} \tag{150}$$

где X_1, X_2, X_3 – соответственно кодированные значения безразмерных сил τ, ξ и χ.

Безразмерные силы τ, ξ и χ представляют собой следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{R_{уд}}{R_x}, \\ \xi &= \frac{Q}{R_x}, \\ \chi &= \frac{G + G_{гу}}{R_x}, \end{aligned} \tag{151}$$

где $R_{уд}$ – распорная сила траловой доски на установленной в результате решения задачи оптимизации скорости траления v;

Q – подъемная сила оснастки верхней подборы трала;

G – заглубляющая сила оснастки нижней подборы трала;

$G_{гу}$ – вес в воде грузов-углубителей (для разноглубинного трала).

Используя известные данные об оснастке конкретных тралов и рассчитав по известному алгоритму [38] их силы сопротивления для найденной оптимальной скорости траления v, могут быть определены натуральные численные значения безразмерных сил τ, ξ и χ. Их декодирование для использования в формулах (150) осуществляется на основе выражений:

$$X_1 = \frac{\tau - \tau_0}{I_\tau}; \quad X_2 = \frac{\xi - \xi_0}{I_\xi}; \quad X_3 = \frac{\chi - \chi_0}{I_\chi}, \qquad (152)$$

где τ_0, ξ_0, χ_0 – средние арифметические значения этих безразмерных сил в диапазоне их изменения, для которых получены формулы (150) [38];

I_τ, I_ξ, I_z – интервал варьирования значений безразмерных сил (разность между средним арифметическим и минимальным значениями) в диапазоне их изменения, для которых получены формулы (150) [38].

На основе таких вычислительных операций могут быть получены зависимости $H = f(u_x, C)$, $L = f(u_x, C)$ и, следовательно, явное выражение $l = f(u_x, C)$. Отсюда следует, что соответствующее ограничение может быть формализовано следующим образом:

$$l_{опт} \geq f(u_x, C). \qquad (153)$$

Характер зависимостей полупериметра устья разноглубинного трала l от значений коэффициентов посадки u_x и циклов кройки C приведен соответственно на рис. 13 и 14.

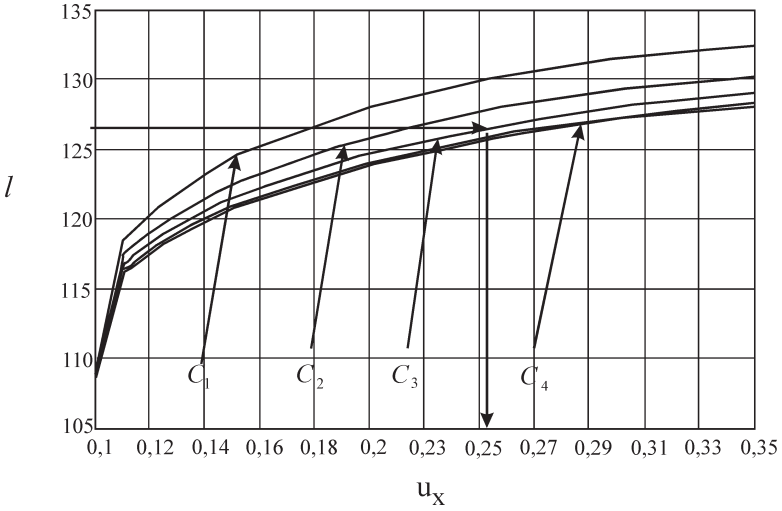

Рис. 13. Характер зависимостей полупериметра устья разноглубинного трала *l* от значений коэффициентов посадки u_x

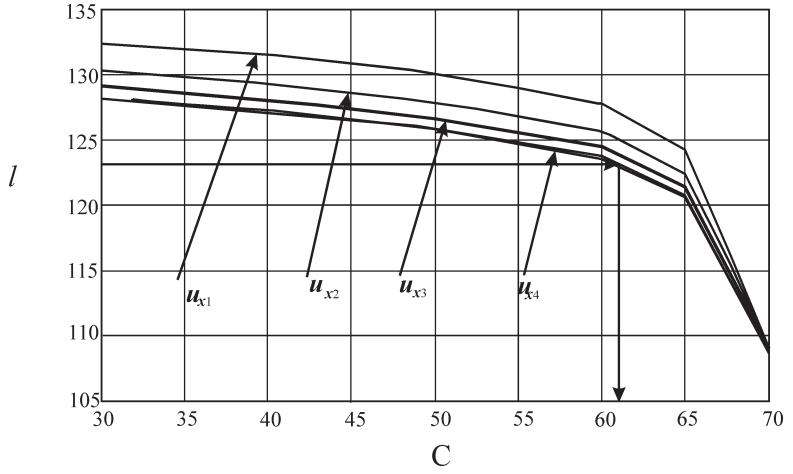

Рис. 14. Характер зависимостей полупериметра устья разноглубинного трала *l* от значений кройки С

Как показано на рис. 13 и 14, на построенных графиках $l = f(u_x, C)$ по найденному оптимальному значению полупериметра устья трала $l_{опт}$ определяются допустимые значения посадочного коэффициента $[u_x]_{доп\ пол}$ (см. рис. 13) и допустимые значения цикла кройки $[C]_{доп\ пол}$ (см. рис. 14).

Таким образом, ***постановка задачи оптимизации проектных характеристик канатно-сетной части трала формулируется следующим образом: определить средние взвешенные значения посадочного коэффициента и циклов кройки , минимизирующие величину силы сопротивления канатно-сетной части трала, то есть***

$$R_x(u_x, C) \rightarrow \min \qquad (154)$$

в области ограничений, накладываемых неравенствами (147) и (153).

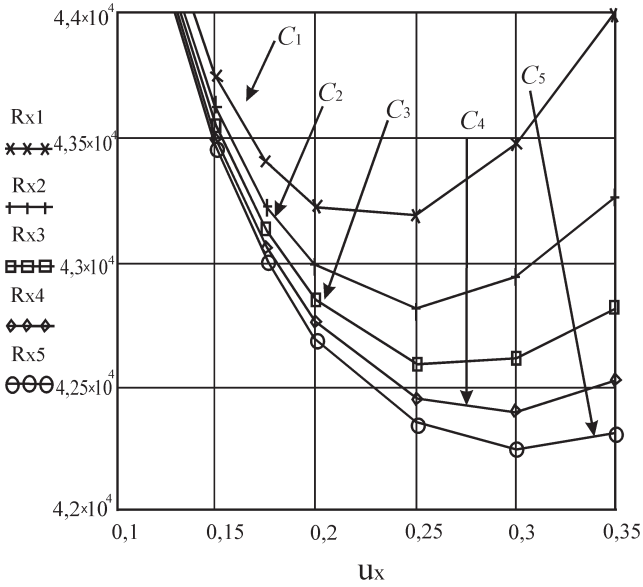

Рис. 15. Характер зависимости силы сопротивления канатно-сетной части трала от средних взвешенных значений посадочного коэффициента и цикла кройки

Теоретический характер графической зависимости $R_x = f(u_x, C)$ показан на рис. 15. Здесь каждая кривая $R_{xi} = f(u_x, C)$, где $i = 1, 2, ..., 5$, соответствует возрастающему среднему взвешенному значению цикла кройки. Как видно из графиков, все кривые имеют четко выраженный минимум и, следовательно, постановка задачи оптимизации конструктивных характеристик u_x и C вполне оправдана.

5.4.2. Анализ целевой функции и ограничений

Для установления фактической зависимости $R_{xi} = f(u_x, C)$ для тралов и величины снижения значений гидродинамического коэффициента сопротивления сетной части донного трала в случае обеспечения значений коэффициентов посадки u_x и циклов кройки C, минимизирующих коэффициент сопротивления, были проанализированы чертежи донных тралов, эксплуатировавшихся в Западном бассейне. Всего исследовано 12 конструкций тралов, наименования которых приведены в табл. 2 и 3. Они эксплуатировались на 5 типах судов: МРТР, МРТРП, СРТМК, СТМ, БМРТ.

Значения коэффициентов сопротивления c_x рассчитывались по формуле (145).

Значения d, a и C рассчитывались по данным, приведенным на чертежах упомянутых донных тралов.

Значения посадочных коэффициентов в технической документации на тралы не приводятся. Поэтому их необходимо определять по приводимой в чертежах информации.

Расчет начинался с определения поперечного посадочного коэффициента u_{xi} в каждой пласти сетной части трала. На чертеже каждой сетной пласти указаны размер гужа $l_{гр}$, шаг ячеи $a_{гр}$ и количество ячей $n_{гр}$, которые крепятся к гужу. Посадочный коэффициент для сетной пластины, прилегающей к гужу, находится как

$$u_{x1} = \frac{l_{гр}}{2 \cdot a_{гр} \cdot n_{гр}}. \qquad (155)$$

Значение посадочного коэффициента, найденное из выражения (155), относится ко всей сетной пластине, прилегающей к гужу.

У некоторых конструкций донных тралов в боковых пластях гуж отсутствует. В этих случаях значение коэффициента u_{x1} для этих пластей принимается равным величине коэффициента посадки, вычисленной для верхней (нижней) пласти.

Поперечный посадочный коэффициент для каждой последующей i-й сетной пластины определяется по формуле:

$$u_{xi} = u_{xi-1} \cdot \frac{n_{ни-1}}{n_{вi}}, \qquad (156)$$

где i – порядковый номер соответствующей сетной пластины, отсчитываемый от первой, прилегающей к гужу;

$n_в$, $n_н$ – количество ячей соответственно по верхней (большой) и нижней (малой) кромкам сетных пластин.

В этих расчетах средние взвешенные значения циклов кройки пластин задавались соответствующими тем данным, которые приведены в каждом из чертежей донных тралов. Для построения графика зависимости $c_x = f(u_x)$ задавались значения средних взвешенных посадочных коэффициентов в диапазоне от 0,2 до 0,5 с шагом 0,05.

В результате на рис. 16 показаны зависимости $c_x = f(u_x)$ для всех 12 исследованных конструкций донных тралов.

Как следует из приведенных графиков, для тралов 26/33 м, 26,9/35,7 м и 40/38 м значения коэффициентов c_x существенно возрастают с увеличением коэффициентов посадки, для остальных конструкций тралов коэффициенты c_x слабо уменьшают свои значения с увеличением коэффициентов посадки. По приведенным зависимостям были установлены значения коэффициентов посадки u_{xopt}, соответствующие минимальным значениям коэффициента сопротивления сетных частей тралов $c_{x\min}$. Далее вычислялись отрицательные приращения коэффициентов сопротивления Δc_x по формуле:

$$\Delta c_x = \frac{c_{x\min} - c_{xj}}{c_{x\min}} \cdot 100\%, \qquad (157)$$

где c_{xj} – фактическое среднее взвешенное значение коэффициента сопротивления сетной части j-го трала;

j – порядковый номер конструкции трала (см. табл. 2).

Как следует из приведенных данных в табл. 2, для двух тралов (26/33 м и 40/38 м) оптимизация посадочных коэффициентов приведет к существенному снижению коэффициента сопротивления c_x, и, следовательно, силы сопротивления сетной части (соответственно на 18,7 и 13,3 %), для остальных конструкций тралов выигрыш в сопротивлении будет меньше (от 9,4 до 7,3 %). Для ряда конструкций тралов принятая посадка близка к оптимальной или оптимальна, а коэффициенты сопротивления имеют значения, близкие к минимальным.

В этих расчетах средние взвешенные значения коэффициентов посадки принимались соответствующими тем данным, которые были рассчитаны по формулам (155) и (156) для каждой конструкции донных тралов.

На рис. 16 показан характер зависимости $c_x = f(C)$ для исследованных конструкций донных тралов. Для их построения задавались

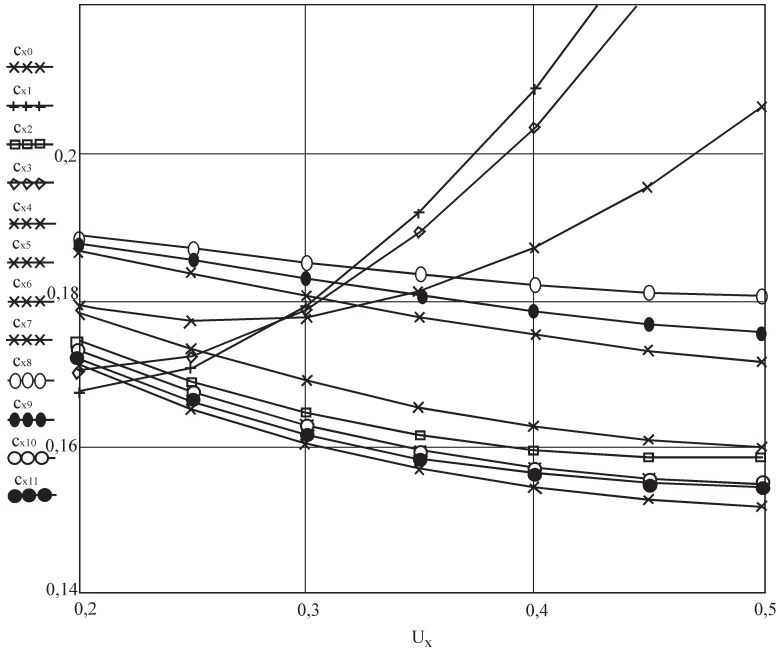

Рис. 16 . Зависимость значений гидродинамических коэффициентов сетной части донных тралов от среднего взвешенного значения горизонтального посадочного коэффициента

значения средних взвешенных циклов кройки пластин в диапазоне от 1 до 40 с шагом 10.

Результаты этих расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

№	Наименование трала	Расчетное значение посадочного коэффициента U_{xj}	Значение посадочных коэффициентов, соответствующих $c_{x\min}$	Расчетное значение коэффициента сопротивления трала c_{xj}	Минимальное значение коэффициента сопротивления $c_{x\min}$	ΔC_x %
1	21,6/33,6	0,439	0,5	0,153	0,15	2,0
2	26/33	0,343	0,2	0,19	0,16	18,7
3	25/28,8	0,347	0,5	0,162	0,15	8,0
4	26,9/35,7	0,269	0,2	0,174	0,17	2,3
5	56/40	0,23	0,5	0,175	0,16	9,4
6	40/38	0,49	0,2	0,204	0,18	13,3
7	45/39,8	0,327	0,5	0,163	0,15	8,7
8	35/36	0,402	0,5	0,176	0,17	3,5
9	28,4/29,1	0,515	0,5	0,185	0,18	2,8
10	40/43	0,657	0,5	0,18	0,18	0
11	31,8/39,8	0,372	0,5	0,161	0,15	7,3
12	41,7/42,2	0,375	0,5	0,161	0,15	7,3

Как следует из приведенных на рис. 17 данных, значения гидродинамического коэффициента сопротивления сетной части донных тралов резко падают в диапазоне значений циклов кройки от 1 до 10, а затем практически остаются постоянными. По приведенным зависимостям были установлены значения циклов кройки C, соответствующие минимальным значениям коэффициента сопротивления сетных частей тралов $c_{x\min}$. Далее вычислялись отрицательные

приращения коэффициентов сопротивления Δc_x по формуле (157). Результаты этих расчетов приведены в табл. 3.

Как следует из приведенных данных в табл. 3, для трех тралов (26/33 м, 26,9/35,7 м и 40/38 м) оптимизация циклов кройки сетных пластин приведет к весьма существенному снижению коэффициента сопротивления c_x, а следовательно, и силы сопротивления сетной части (соответственно на 35,7, 16 и 36 %), для остальных конструкций тралов выигрыш в сопротивлении будет меньше (от 7,3 до 5,9 %). Для ряда конструкций тралов принятые циклы кройки близки к оптимальным, а коэффициенты сопротивления имеют значения, близкие к минимальным. По результатам выполненных исследований можно заключить, что оптимизация значений коэффициентов посадки и циклов кройки в принципе позволяет существенно снизить силы сопротивления сетной части донных тралов (до 50 % и более). Далее вычислялись отрицательные приращения коэффициентов сопротивления Δc_x по формуле (157). Результаты этих расчетов приведены в табл. 3.

Для установления ограничения (147) и определения вида зависимости формы меридиана сетной оболочки трала от среднего взвешенного значения посадочного коэффициента $u_м$ были проведены эксперименты с моделью разноглубинного трала в гидроканале ЗАО «МариНПО». Эксперименты выполнялись под руководством автора аспиранткой кафедры промышленного рыболовства Е. А. Селих и магистрантами той же кафедры М. В. Савиным и Д. Л. Моисеевым [44].

Гипотетическая необходимость в ограничении (147) была принята по той причине, что форма меридиана канатно-сетной оболочки трала определяется приложенными к ней силами. Как следует из выражения (146), продольные $\sigma_м$ и поперечные σ_y напряжения в сетной оболочке зависят от значения посадочного коэффициента. Очевидно, что гидродинамические силы и стягивающие усилия определяют форму меридиана и в соответствии с выражением (146) она должна зависеть от значения посадочного коэффициента $u_м$. Результаты эксперимента с моделью трала должны были подтвердить или опровергнуть эту гипотезу.

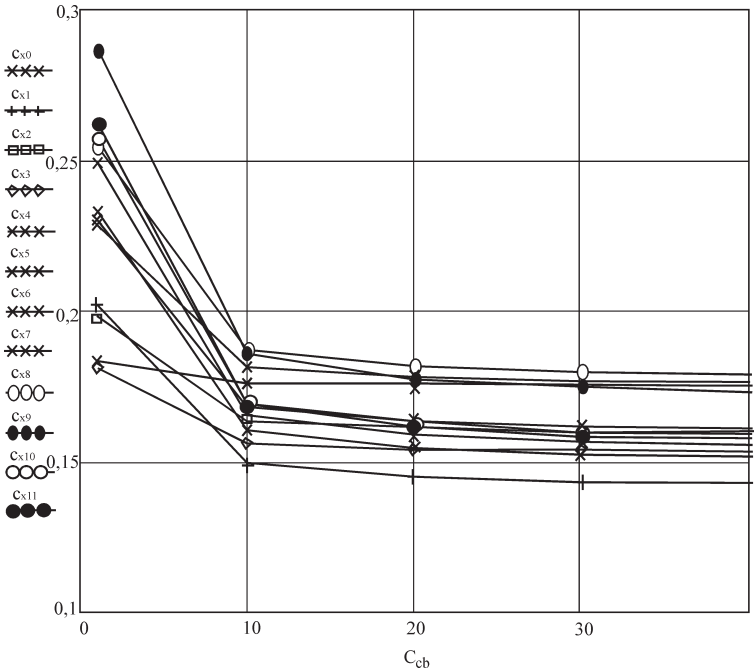

Рис. 16. Зависимости силы сопротивления канатно-сетной части трала от цикла кройки при различных значениях посадочного коэффициента

Таблица 3

№	Наименование трала	Расчетное значение посадочного коэффициента u_{xj}	Значение посадочных коэффициентов, соответствующих $c_{x\min}$	Расчетное значение коэффициента сопротивления трала c_{xj}	Минимальное значение коэффициента сопротивления $c_{x\min}$	ΔC_x %
1	2	3	4	5	6	7
1	21,6/33,6	0,439	0,5	0,153	0,15	2,0
2	26/33	0,343	0,2	0,19	0,16	18,7
3	25/28,8	0,347	0,5	0,162	0,15	8,0

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
4	26,9/35,7	0,269	0,2	0,174	0,17	2,3
5	56/40	0,23	0,5	0,175	0,16	9,4
6	40/38	0,49	0,2	0,204	0,18	13,3
7	45/39,8	0,327	0,5	0,163	0,15	8,7
8	35/36	0,402	0,5	0,176	0,17	3,5
9	28,4/29,1	0,515	0,5	0,185	0,18	2,8
10	40/43	0,657	0,5	0,18	0,18	0
11	31,8/39,8	0,372	0,5	0,161	0,15	7,3
12	41,7/42,2	0,375	0,5	0,161	0,15	7,3

В качестве объекта указанных исследований был выбран пелагический трал 76,4/198 м для лова кильки и салаки в Балтийском море. Для проведения исследований экспериментаторами были изготовлены три модели трала 76,4/198 м, отличающиеся только средними взвешенными по сетной оболочке значениями посадочного коэффициента $u_м$, все остальные характеристики моделей имели одинаковые значения. Средние взвешенные значения шага ячеи a и диаметра канатов и ниток d определялись из условия равенства относительных площадей для моделей и натурного трала, то есть

$$\frac{d_м}{d_м} \cdot \frac{1}{u_{хм} \cdot u_{ум}} = \frac{d_н}{d_н} \cdot \frac{1}{u_{хн} \cdot u_{ун}}, \qquad (158)$$

где индексом «м» обозначены характеристики моделей, индексом «н» – характеристики натурного трала.

Силовой масштаб C_R для расчета сил оснастки моделей определялся из критерия подобия Ньютона:

$$\frac{C_R \cdot C_a}{C_\rho \cdot C_d \cdot C_l^2 \cdot C_v^2} = 1, \qquad (159)$$

где C_p – масштаб плотности жидкости.

Отклонение от условия (159) не превышало 5%.

В процессе исследований производились измерения расстояний между меридианами моделей тралов в горизонтальной и вертикальной плоскостях в сечениях по длине.

В результате выполненных экспериментов были получены координаты меридиана моделей канатно-сетной части трала в горизонтальной и вертикальной плоскостях при разных средних взвешенных значениях посадочного коэффициента $u_м$. На рис. 17 и 18 приведены графики, показывающие изменение безразмерных значений ординат меридиана модели трала при изменении безразмерных значений их абсцисс, относящиеся к моделям с различной величиной посадочных коэффициентов соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Как следует из приведенных экспериментальных данных, зависимость формы меридиана от посадочных коэффициентов пренебрежимо мала. Поэтому ограничение (147) следует снять, и на оптимизируемые параметры $u_м$ и C накладываются ограничения, вытекающие из неравенства (153), $u_м \geq [u_x]_{доп\ no\ l}$ и $C \leq [C]_{доп\ no\ l}$. В этой связи формальную постановку задачи оптимизации взамен (153) следует переписать в виде:

$$\left.\begin{aligned} &R_x(u_x, C) \to \min; \\ &u_x \geq [u_x]_{доп\ no\ l}; \\ &C \leq [C]_{доп\ no\ l}. \end{aligned}\right\} \qquad (160)$$

Для определения способа установления второго ограничения (159) выполнены исследования зависимости $R_x = f(C)$. В этих целях проведены численные эксперименты с выражением (141) и (142) в диапазоне значений C = 1÷100, u_x = 0,1÷0,3, $d/a = 1 \cdot 10^{-3} \div 9 \cdot 10^{-4}$. Результаты приведены на рис. 16 и 17.

Как следует из рис. 17 и 18, зависимость $R_x = f(C)$ включает две области: область сильного влияния цикла кройки на сопротивление канатно-сетной части трала в диапазоне 0÷10 и область практически полного отсутствия такого влияния при $C > 10$. Такой

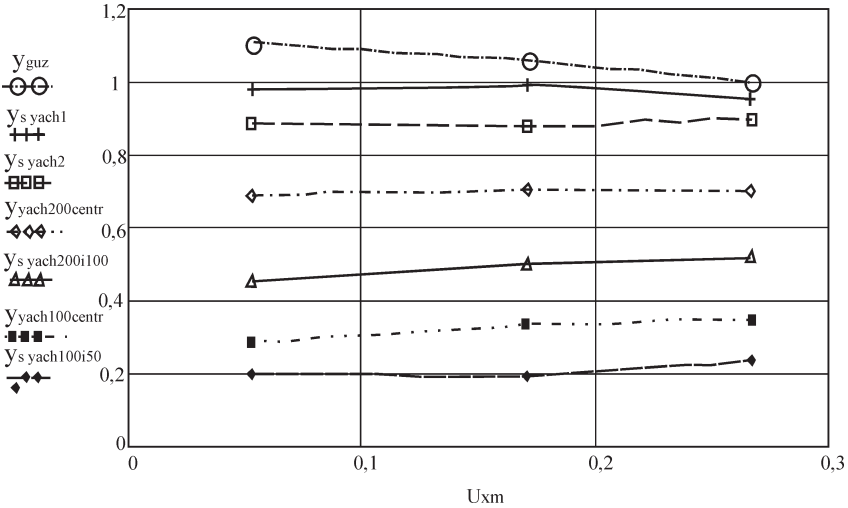

Рис. 17. Графики изменения безразмерных значений ординат меридиана модели трала при изменении безразмерных значений их абсцисс в горизонтальной плоскости

характер этой зависимости сохраняется в широком диапазоне значений посадочного коэффициента. Аналогичный характер зависимости $R_x = f(C)$ приведен на рис. 18 для различных значений соотношения *d/a*. Как видим, положение нижней точки первой области весьма стабильно, во всех случаях $C = 10$. Это значение может быть принято в качестве оптимального, т.к. при увеличении этой величины в 10 раз сопротивление изменяется лишь на 0,5%.

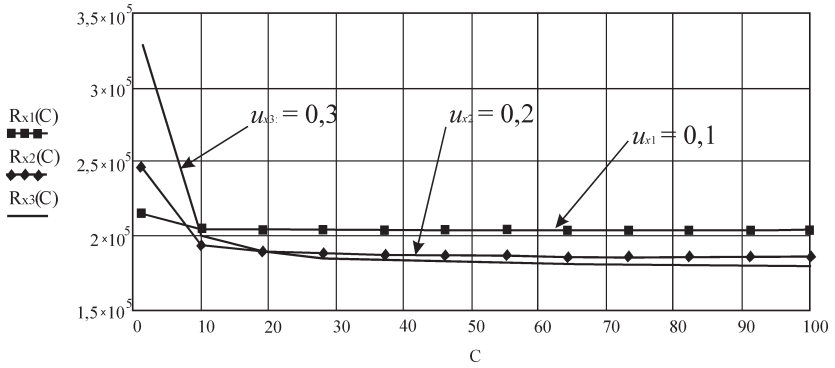

Рис. 18. Зависимости силы сопротивления канатно-сетной части трала от цикла кройки при различных значениях посадочного коэффициента

Из данных рис. 18 и 19 очевидно, что значение цикла кройки может быть назначено равным $C = 10$.

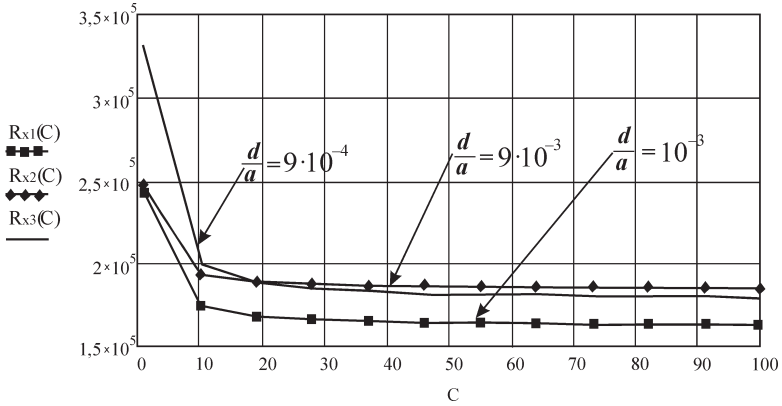

Рис. 19. Зависимости силы сопротивления канатно-сетной части трала от цикла кройки при различных значениях соотношения диаметра ниток и шага ячеи

В связи с тем, что значение одного из оптимизируемых параметров (цикл кройки C) может быть назначено по результатам исследования зависимости $R_x = f(C)$, оптимальное значение второй переменной $u_м$ может быть найдено исследованием целевой функции $R_x = f(u_x)$ на минимум.

В этих целях необходимо найти корень уравнения (145), в котором первая производная по переменной u_x этого выражения приравнивается к 0. Полученное таким образом значение коэффициента посадки u_x должно быть сопоставлено с первым ограничением системы выражений (160), то есть необходимо проверить выполнение условия

$$u_x \geq [u_x]_{доп\ nol}.$$

Если это условие выполняется, то расчетное значение u_x является оптимальным, то есть $u_x = u_{xopt}$. В противном случае оптимальным будет граничное значение: $[u_x]_{доп\ nol} = u_{xopt}$.