УДК 629.12 ***DOI: 10.46960/2782-5477_2023_4_12***

А.Н. Волков, В.В. Князьков

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАЛОГО РЫБОЛОВНОГО ТРАУЛЕРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлена разработка алгоритма и математической модели определения основных элементов промыслового судна с использованием информационных технологий. Траулеры входят в основную группу добывающих судов. В зависимости от назначения, района плавания, формы организации промысла созданы различные виды траулеров, которые отличаются главными размерениями, промысловыми устройствами, типами энергетических установок, технологическим оборудованием, различными архитектурно-конструктивными типами и другими признаками. Практическая значимость работы определяется тем, что удачно спроектированный корпус судна-прототипа, построение модели поверхности корпуса по уже имеющемуся теоретическому чертежу и последующее ее редактирование позволяют получить модель поверхности корпуса рыболовного траулера необходимых размеров.

Ключевые слова: рыбопромысловое судно, траулер, форма корпуса, информационные технологии, моделирование поверхности корпуса, оптимизация.

Введение

Одним из приоритетных направлений развития морского рыболовства является реализация проектов по строительству новых рыболовных судов и создание условий для преимущественного размещения заказов на их строительство на российских судостроительных предприятиях [1]. При этом очевидно, что развитие отечественной судостроительной отрасли тесно связано с развитием всей российской экономики. Исходя из степени благоприятности макроэкономических и отраслевых предпосылок, в [2] рассматриваются три сценария развития судостроительной промышленности: инновационный, целевой и консервативный (табл. 1). На период до 2035 г. инновационный сценарий является базовым для реализации стратегии развития судостроительной промышленности, в том числе и для судов промыслового флота. Мера государственной поддержки обновления рыбопромыслового флота и развития переработки рыбы – выделение квот на инвестиционные цели («квоты под киль»), предусмотрена обновленным федеральным законом [3]. Данные изменения действующего законодательства РФ послужили отправной точкой строительства нового рыбопромыслового флота, загрузки судостроительных предприятий и их смежников. Стартовая программа строительства промысловых судов приведена на рис. 1.

В программе «квоты под киль» принимают участие 11 судостроительных заводов и верфей, на которых, по сообщению РК-ПРОФИ №49 (826) от 16 декабря 2020 г., будет построено 91 судно. Например, в ходе первой волны компании «квоты под киль» на ПАО судостроительный завод «Северная верфь» (г. Санкт-Петербург) предусмотрено строительство 10 траулеров-процессоров проекта 170701 [4]. В октябре 2023 г. завершились ходовые испытания головного судна проекта «Капитан Соколов» (рис. 2, *а*), в процессе которых удалось подтвердить все основные параметры траулера [5]. Шесть траулеров данной серии предназначены для Северного бассейна и 4 судна для Дальнего Востока [4]. Особая форма носа (*Enduro Bow*) судов этой серии увеличивает рабочее пространство на судне, улучшает мореходные качества, уменьшает удары встречной волны в носовую оконечность, снижает обледенение корпуса.

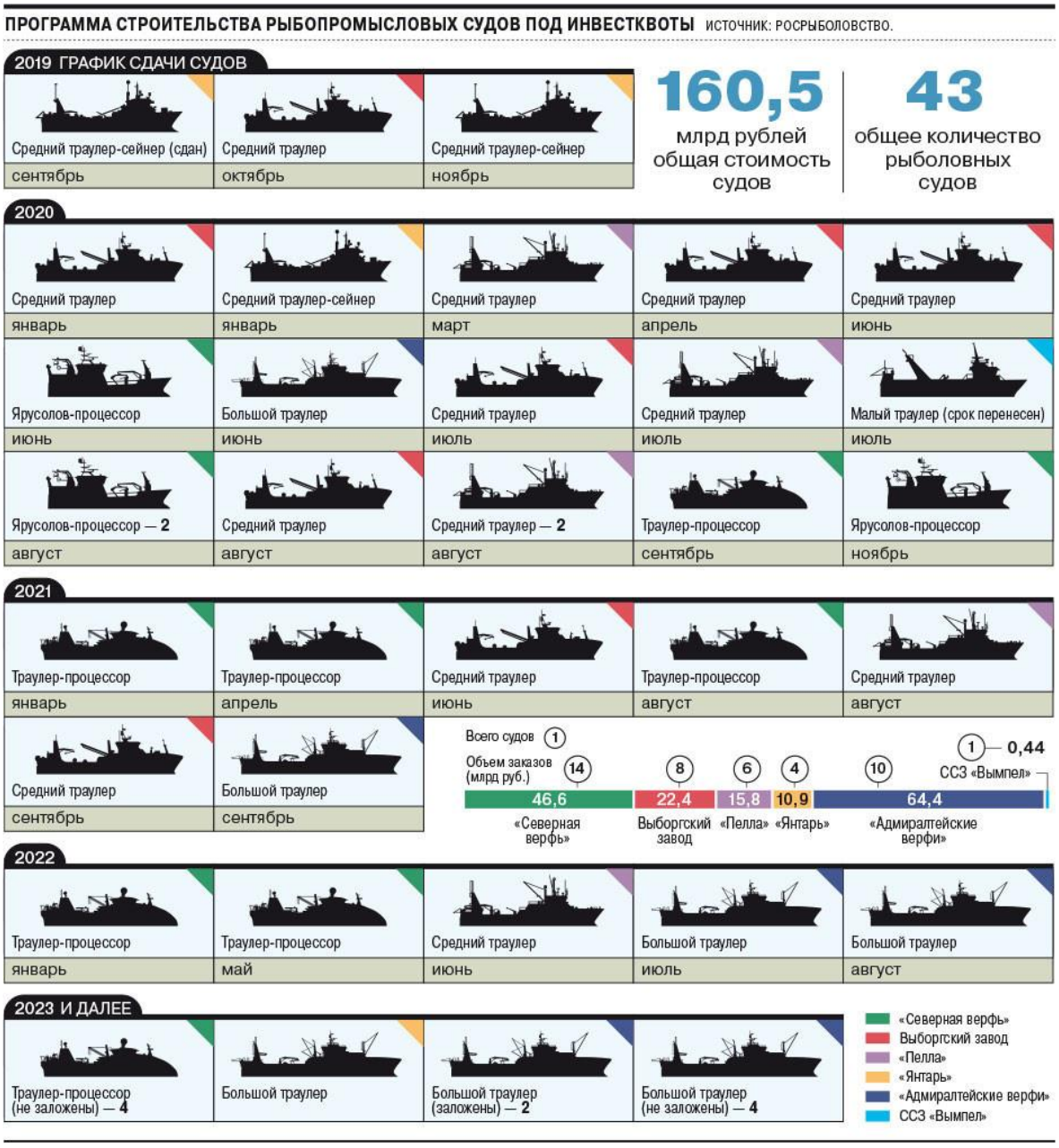


Рис. 1. Стартовая программа строительства промысловых судов под инвестквоты [6]

Характерными представителями траулеров нового поколения можно считать суда проекта 03095 типа «Андромеда» (рис. 2, *б*). Суда имеют наклонный форштевень, бульбообразный нос, конструктивный дифферент и транцевую корму. Вертикальный на большей части длины вертикальный борт позволяет им безопасно швартоваться в море.

Траулеры относятся к основной группе добывающих судов морского и океанического рыболовства и образуют один из наиболее многочисленных отрядов судов самых разнообразных модификаций [7, 8]. Общие вопросы, связанные с особенностями проектирования промысловых судов, оптимизацией их характеристик и элементов достаточно подробно рассмотрены в [9, 10]. Однако отдельные аспекты проектирования промысловых судов в современных условиях требуют дополнительных исследований, что предопределило появление различных математических моделей, например, для оценки технико-экономических характеристик траулеров на ранних стадиях их размерной модернизации [11] или с учетом случайных факторов функционирования [12].

Таблица 1.
Сценарии строительства промысловых судов до 2035 г.

Номенклатура	2018 год	2019-2020 гг.	2021-2025 гг.	2026-2030 гг.	2031-2035 гг.	Итого
I. Инновационный сценарий						
Суда рыбопромыслового флота – всего, ед.	-	23	54	30	27	134
в том числе:						
добывающие и перерабатывающие суда, ед.	-	22	45	24	18	109
обслуживающие суда, ед.	-	1	9	6	9	25
II. Целевой сценарий						
Суда рыбопромыслового флота – всего, ед.	-	22	67	62	43	194
в том числе:						
добывающие и перерабатывающие суда, ед.	-	22	51	43	30	146
обслуживающие суда, ед.	-	-	16	19	13	48
III. Консервативный сценарий						
Суда рыбопромыслового флота – всего, ед.	-	14	40	23	28	105
в том числе:						
добывающие и перерабатывающие суда, ед.	-	14	34	15	15	78
обслуживающие суда, ед.	-	-	6	8	13	27

Рассмотрим задачу определения оптимальных элементов малого рыболовного траулера. Форма корпуса промыслового судна оказывает существенное влияние на все его важнейшие качества как инженерного сооружения [9]. Выбор формы корпуса судов является одной из основных и наиболее сложных задач проектирования судна. Для правильности отдельных решений, например, для применения носовых бульбов, требуется экспериментальное подтверждение [13]. Разработка методологических основ выбора параметров формы и исследование особенностей формы корпуса судов с применением современных информационных технологий является одним из важнейших путей повышения эффективности проектирования.

а) *б)*

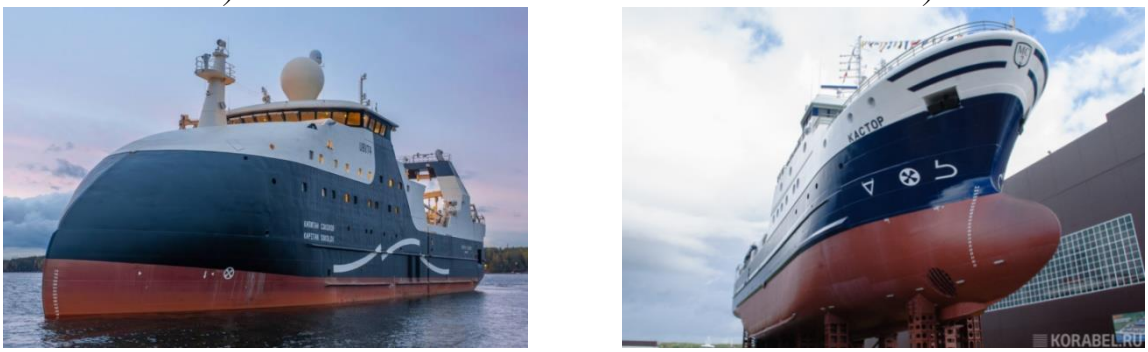


Рис. 2. Траулеры нового поколения:
а – головной морозильный траулер-процессор проекта 170701 «Капитан Соколов»;
б – траулер-процессор проекта 03095 «Кастор»
(фото с сайтов aoosk.ru и korabel.ru)

Постановка задачи

Для промыслового судна задача определения его основных элементов может быть сформулирована следующим образом: определить размеры судна, форму корпуса, необходимое количество балласта и его размещение, принципиальную компоновку основных отсеков судна, а также принципиальное размещение расходуемых запасов топлива и воды. Полученное решение должно обеспечивать наилучшее значение критерия экономической эффективности. При этом должны выполняться требования к плавучести, посадке, остойчивости и качки в основных эксплуатационных состояниях нагрузки судна.

Правилами [14] определены, например, следующие случаи загрузки, при которых должна проверяться остойчивость рыболовных судов:

- выход на промысел с полными запасами;
- возвращение с промысла с полным уловом в трюме и на палубе, если палубный груз предусматривается проектом, и с 10 % запасов;
- возвращение с промысла с 20 % улова в трюме или на палубе с 70 % нормы льда и соли и с 10 % запасов;
- выход из района промысла с полным грузом и с количеством запасов, обеспечивающих осадку судна по грузовую марку.

Для судов, ведущих промысел сетями, для всех указанных случаев загрузки должны быть предусмотрены мокрые сети на палубе.

На рис. 3 приведена принципиальная блок-схема для определения оптимальных элементов рыболовного судна. Для решения поставленной задачи особое значение обретают также вопросы организации промысла [15]. Все вновь построенные промысловые суда имеют технические возможности, как для эффективной автономной работы, так и для удобной передачи выработанной продукции на транспортный рефрижератор, приема на борт снабжения, тары и т.д. с дальнейшим комфортным продолжением работы в промысловом районе. Полагаются известными (из результатов предварительного анализа) районы промысла и их удаленность, организация работы судна в различных районах, а также номенклатура выпускаемой судном рыбной продукции или полуфабриката. Расчетная модель состоит из 29 блоков, которые структурированы в пять укрупненных разделов и позволяют рассчитать все необходимые элементы судна и параметры, входящие в функции ограничений и критерия эффективности судна.

В оптимизируемые элементы включены главные размерения судна и коэффициент полноты водоизмещения. Для решения поставленной задачи используются следующие уравнения проектирования:

- *уравнение плавучести (без учета коэффициента выступающих частей)*

$$D = \rho\delta LBT\ , \tag{1}$$

где D – водоизмещение; ρ – плотность воды; δ – коэффициент полноты водоизмещения; L, B, T – длина, ширина и осадка судна;

- *уравнение масс:*

$$D = \sum m_i\ , \tag{2}$$

где Σm_i – означает сумму масс всех конструкций, оборудования, механизмов, экипажа, запасов, грузов и т.д.;

- *уравнение вместимости:*

$$W = \sum W_i\ , \tag{3}$$

где W – теоретический объем корпуса с надстройками и рубками, определяемый его размерами и формой; ΣW_i – сумма потребных теоретических объемов всех помещений судна;

уравнение остойчивости:

$$h = z_c + r - z_g\ , \tag{4}$$

где z_c и z_g – возвышение центра величины и центра тяжести над основной плоскостью; r – поперечный метацентрический радиус;

- *уравнение мощности:*

$$N_e = \frac{Rv}{x\eta_в\eta_п\eta_p\eta_к}, \qquad (5)$$

где N_e – мощность энергетической установки; R – сопротивление воды движению; v – скорость движения судна; x – число гребных винтов; $\eta_в$, $\eta_п$, η_p, $\eta_к$ – соответственно КПД валопровода, передачи, гребного винта и коэффициент влияния корпуса.

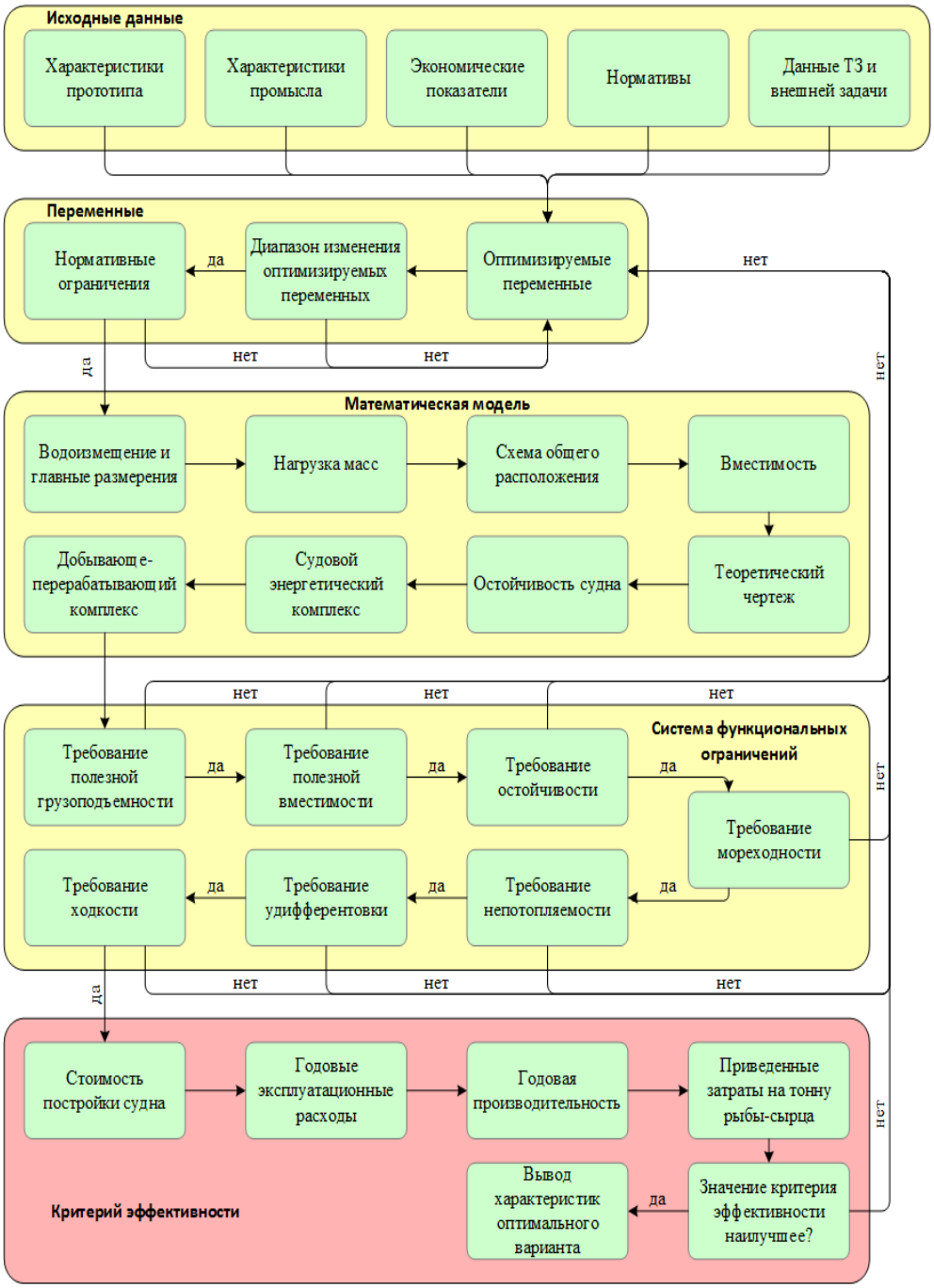


Рис. 3. Принципиальная блок-схема определения оптимальных элементов промыслового судна

Система ограничений состоит из нескольких характерных групп. В первую очередь, это двусторонние ограничения главных размерений и их соотношений, коэффициента полноты водоизмещения, абсциссы центра величины:

$$L^{\min} \le L \le L^{\max};\ B^{\min} \le B \le B^{\max};\ T^{\min} \le T \le T^{\max};\ H^{\min} \le H \le H^{\max};\ \delta^{\min} \le \delta \le \delta^{\max};$$

$$\left(\frac{L}{B}\right)^{\min} \le \left(\frac{L}{B}\right) \le \left(\frac{L}{B}\right)^{\max};\ \left(\frac{B}{T}\right)^{\min} \le \left(\frac{B}{T}\right) \le \left(\frac{B}{T}\right)^{\max};\ \left(\frac{L}{H}\right)^{\min} \le \left(\frac{L}{H}\right) \le \left(\frac{L}{H}\right)^{\max};$$

$$\left(\frac{x_c}{L}\right)^{\min} \le \left(\frac{x_c}{L}\right) \le \left(\frac{x_c}{L}\right)^{\max}.$$

Следующая группа ограничений связана с характеристиками судна или диапазона их возможных значений, указанными в техническом задании на проектирование:

- $v \ge v^{\min}$ – скорость при расчетном водоизмещении должна быть не меньше минимально допустимой;
- $T_{\text{т}} \ge T_{\text{т}}^{\min}$ – тяга в режиме траления должна быть не меньше минимально допустимой;
- $W_{ir}^{\min} \le W_{ir} \le W_{ir}^{\max}$ – вместимость грузовых и служебных помещений находится в диапазонах допустимых значений. Индекс i соответствует типу помещения, индекс r – его порядковому номеру;

- $\sum_r k_r v_r \ge \frac{m_{\text{т}}}{\rho_{\text{т}}} + \frac{m_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} + \frac{m_{\text{жб}}}{\rho_{\text{жб}}}$ – емкость цистерн достаточна для размещения запаса топлива, воды и жидкого балласта. Индекс r соответствует порядковому номеру цистерны;

- v_r – объем цистерны;
- k_r – коэффициент потерь объема;
- $m_{\text{т}}$, $m_{\text{в}}$, $m_{\text{жб}}$ – масса запасов топлива и пресной воды, жидкий балласт;
- $\rho_{\text{т}}$, $\delta_{\text{в}}$, $\rho_{\text{жб}}$ – соответствующие плотности.

В расчетах также учитываются ограничения, связанные с разработкой схемы общего расположения, с требованиями к высоте надводного борта, посадке судна, остойчивости и качке, например:

- $h_i \ge h_i^{\min}$ – начальная остойчивость судна для всех состояний нагрузки не меньше минимально допустимой;
- $\tau_i \ge \tau_i^{\min}$ – период бортовой качки не меньше минимально допустимого значения;
- $\frac{h_i}{B} \le \left(\frac{h}{B}\right)^{\max}$ – относительная начальная метацентрическая высота не больше максимально допустимой, где i – расчетный случай нагрузки.

Для промысловых судов особенно важна оптимальная нагрузка, которая должна обеспечиваться сбалансированным количеством груза и топлива, чтобы судно могло максимально эффективно использоваться в условиях ограниченной мощности и расстояния до места выгрузки рыбы. Оптимальное использование дедвейта позволяет обеспечить максимальную прибыльность промысла, снизить расходы на топливо и другие эксплуатационные расходы, а также увеличить производительность работы судна.

В качестве критерия экономической эффективности приняты приведенные затраты, отнесенные к количеству добытой рыбы, учитывающие как стоимость постройки судна, так и эксплуатационные расходы

$$f_i(\text{X}) = \frac{1}{Q_i}\left(C_i + E_{\text{н}} K \frac{T_i}{T_{\text{э}}}\right), \qquad (6)$$

где C_i, Q_i – эксплуатационные расходы и объем выполняемой работы судном за период T_i; K, $E_н$ – стоимость постройки серийного судна и нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; $T_э$ – годовой эксплуатационный период судна с учетом нормативного времени ремонта и планового отстоя судна.

Выбор судна-прототипа

Для тестирования разработанного алгоритма в качестве судна-прототипа использовался малый рыболовный траулер проекта Т30В [16]. Это однокорпусное двухпалубное стальное судно, одновальное, с кормовым расположением машинного отделения, с траловым слипом в корме, рыбообрабатывающем цехом под верхней палубой, рефрижераторным трюмом в средней части, с надстройкой и одноярусной навигационно-промысловой рубкой (рис. 4). Класс судна РС КМ ✪ Ice 3 R1 Fishing vessel.

Рис. 4. Малый рыболовный траулер проекта Т30В «Вымпел» (фото с сайта seatech.ru)

Форма корпуса

Вопрос о выборе параметров формы рыболовного судна чрезвычайно сложен и не может быть изложен в виде рекомендаций, в равной степени пригодных для судов любых размеров и назначений. Самой полной характеристикой формы корпуса судна является его теоретический чертеж. Наряду с ним, представление о форме корпуса судна дают обобщенные безразмерные характеристики – соотношения главных размерений судна и коэффициенты полноты. От значения этих характеристик во многом зависят как мореходные, так и другие качества судна. Требования, предъявляемые к форме корпуса для обеспечения совокупности этих качеств, весьма противоречивы. Поэтому при проектировании судна и его теоретического чертежа сразу следует выделить те требования, которые играют решающую роль для данного судна, например, ходкость, остойчивость, поведение на волнении.

На многих судах малого и среднего тоннажа, в том числе, на промысловых, килевая линия имеет наклон – так называемый конструктивный дифферент на корму. При его наличии у судов заметно увеличивается осадка кормой, что позволяет, в свою очередь, увеличить диаметр гребного винта. Конструктивный дифферент на корму позволяет избежать также появления эксплуатационного дифферента на нос и связанной с ним неустойчивости на курсе (рыскливости), облегчает управление малотоннажными судами в свежую погоду вследствие улучшения устойчивости на курсе [9].

Бульбовые образования одно время рекомендовались для применения лишь на крупнотоннажных судах промыслового флота с длительным ходовым режимом, например, на транспортных рефрижераторных судах дальних рейсов [9]. У рассматриваемого судна наклонный форштевень с бульбом; такая форма носовой оконечности в последнее время, как правило, применяется на судах данного типа. Для траулеров с кормовым тралением характерна транцевая корма, так как плоский срез транца конструктивно удобен для

устройства слипа, а большая ширина кормовой части ватерлинии защищает гребной винт от намотки всплывших сетей и тросов. С такой формой кормы верхняя ветвь ахтерштевня имеет прямолинейный участок. Теоретический чертеж (проекция *Корпус*) судна-прототипа приведен на рис. 5, *а*, модель теоретической поверхности корпуса, построенная с использованием SolidWorks [17, 18] – на рис. 5, *б*.

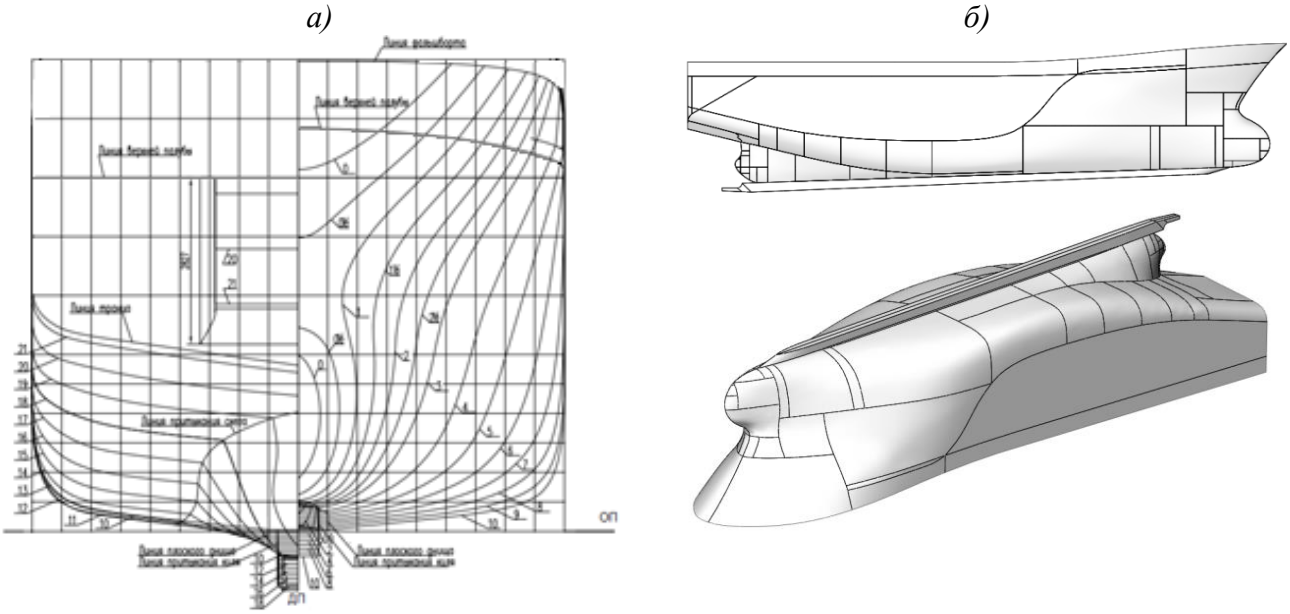


Рис. 5. Малый рыболовный траулер:
а – теоретический чертеж судна-прототипа; б – модель поверхности корпуса

Общий характер обводов судна проекта Т30В дает основание использовать его в качестве прототипа при проектировании размерного ряда судов данного типа. Обводы проектируемого судна будут быть геометрически подобны обводам судна-прототипа или незначительно отличаться от них соотношением главных размерений. Используя коэффициенты масштабирования по трем координатным осям ($k_x=L/L_0$, $k_y=B/B_0$, $k_z=T/T_0$ – коэффициенты аффинных преобразований), можно будет получить поверхность корпуса рыболовного траулера необходимых размеров с возможностью ее редактирования и последующим формированием на ее базе теоретического чертежа.

Решение задачи

Для решения поставленной задачи определения оптимальных элементов промыслового судна была выбрана встроенная в среду *MS Excel* программа *Solver* (*Поиск решения*). Используется метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ). Данный метод применяется для поиска минимума или максимума целевой функции. Метод ОПГ основан на итерационном алгоритме, который позволяет приближенно находить решение нелинейной задачи оптимизации.

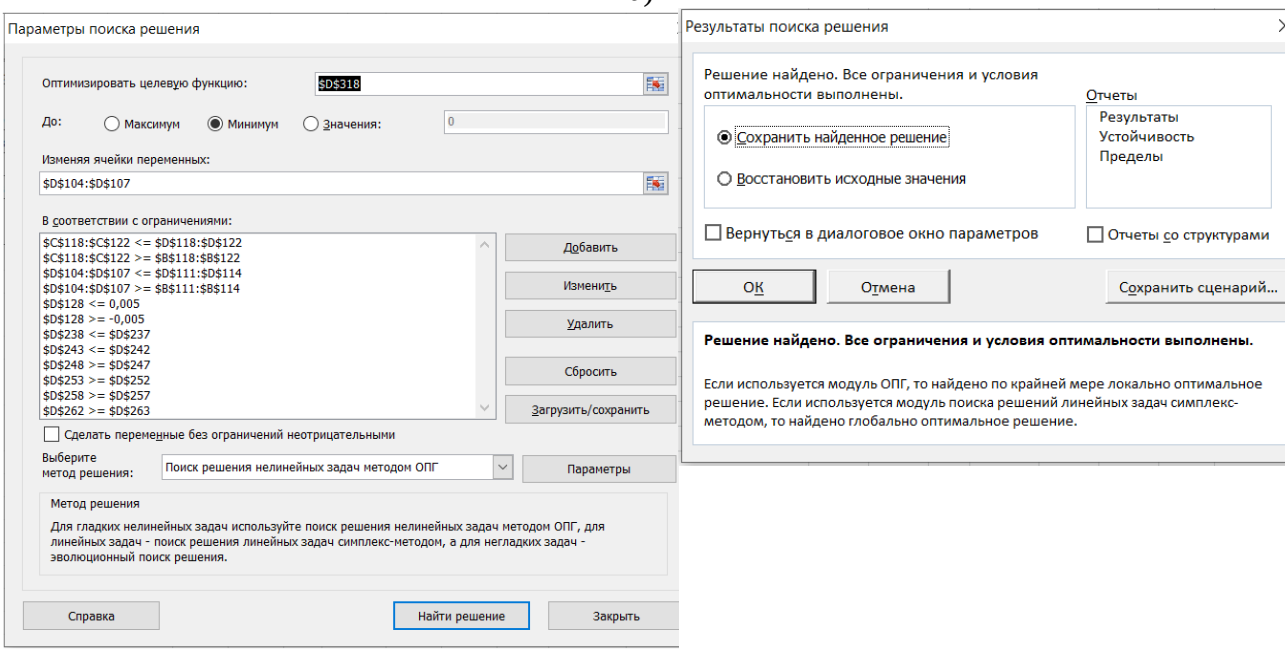
Общий алгоритм решения оптимизационных задач в *MS Excel* следующий.

1. Составить математическую модель.
2. Ввести на рабочий лист *Excel* условия задачи:
   а) создать таблицу на рабочем листе для ввода условий задачи;
   б) ввести исходные данные, целевую функцию, ограничения.
3. Выполнить команду Данные → Анализ → Поиск решения.
4. Указать параметры в диалоговом окне *Параметры поиска решения*, выполнить решение.

5. Проанализировать полученные результаты.

Для тестирования разработанного алгоритма с учетом технических характеристик находящихся в эксплуатации рыболовных траулеров [19] значение дедвейта принято DW = 400 т. Диалоговые окна, иллюстрирующие порядок расчета для решения задачи и фрагмент отчета с результатами, приведены на рис. 7.

а)



б)

Ячейка целевой функции (Минимум)

Ячейка	Имя	Исходное значение	Окончательное значение
$D$316	*Приведенные затраты*	5 577,09	6 424,85

Ячейки переменных

Ячейка	Имя	Исходное значение	Окончательное значение
$D$102:$D$105			
$D$102	*L*	60,00	44,60
$D$103	*B*	10,00	11,60
$D$104	*H*	6,00	7,76
$D$105	*T*	3,00	3,90

Рис. 7. Диалоговые окна *Excel*:
а – параметры поиска решения; б – фрагмент отчета с результатами решения

Для найденных значений главных размерений судна (рис. 7, *б*) была перестроена модель поверхности корпуса (рис. 8).

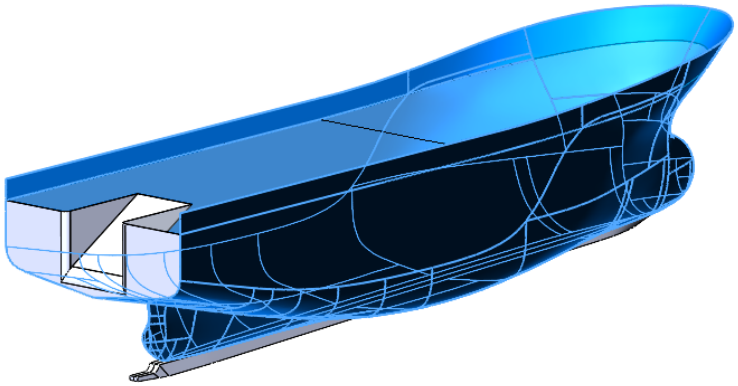


Рис. 8. Модель поверхности проектируемого судна

С использованием инструментов *SolidWorks* [17] для полученной модели затем были выполнены расчеты элементов теоретического чертежа, построена эпюра емкости, проверены вместимость и непотопляемость. Модель поверхности позволяет, если это необходимо, достаточно быстро сформировать теоретический чертеж.

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет определить главные размерения рыболовного траулера, удовлетворяющие всем основным требованиям и соответствующие минимальному значению приведенных затрат. При выборе значений дедвейта, скорости, автономности, которые предопределяют размеры будущего судна, следует руководствоваться программой строительства рыболовных судов, учитывая при этом, основные характеристики ранее построенных судов. Удачный выбор судна-прототипа с отработанной формой корпуса, а также наличие его теоретического чертежа существенно упрощают задачу моделирования поверхности корпуса и выполнение основных проектных расчетов с ее использованием.

Библиографический список

1. Морская доктрина Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 31 июля 2022 г. № 512, 2022.
2. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.10.2019 № 2553-р, 2019.
3. О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов (с изменениями на 29 декабря 2022 г.) (редакция, действующая с 30 марта 2023 г.) Федеральный закон от 20 декабря 2004 г. № 166-ФЗ.
4. Васильев, А.М. Новые траулеры-процессоры и заводы: проблемы эксплуатации в арктическом рыбохозяйственном комплексе // Рыбное хозяйство. 2022. № 2. С. 24-30.
5. «Капитан Соколов» завершил ходовые испытания [Электронный ресурс]. URL: http://aoosk.ru/press-center/news/kapitan-sokolov-zavershil-khodovye-ispytaniya/ (дата обращения 1.09.2023).
6. Федеральное Агентство по рыболовству [Электронный ресурс]. URL: https://fish.gov.ru (дата обращения 1.09.2023).
7. Каменский, Е.В. Траулеры и сейнеры / Е.В. Каменский, Г.Б. Терентьев. – Л.: Судостроение, 1978. – 216 с.
8. Волков, А.Н. Анализ состояния и тенденции развития промысловых траулеров / А.Н. Волков, В.А. Зуев // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 34. С. 1032-1040.
9. Раков, А.И. Проектирование промысловых судов / А.И. Раков, Н.Б. Севастьянов. – Л.: Судостроение, 1981. – 376 с.

10. Раков, А.И. Оптимизация основных характеристик и элементов промысловых судов / А.И. Раков. – Л.: Судостроение, 1978. – 232 с.
11. Дятченко, С.В. Математические модели для оценки технико-экономических характеристик траулеров на ранних стадиях их размерной модернизации / С.В. Дятченко, С.В. Тананыкин // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4 (38). Т. 2. С. 55-63.
12. Бугаев, В.Г. Оптимизация характеристик и элементов рыболовных судов с учетом случайных факторов их функционирования / В.Г. Бугаев, Дам Ван Тунг, Ю.В. Бондаренко // Вестник инженерной школы ДВФУ, 2021. № 1(46). С. 24-35.
13. Чуреев, Е.А. Исследование формы обводов маломерного рыболовного траулера с целью повышения его мореходных качеств // Морские интеллектуальные технологии, 2018. № 4 (42). Т. 3. С. 36-43.
14. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской Регистр судоходства. – СПб, 2022.
15. Волков, А.Н. Особенности организации рыбного промысла в современных условиях / А.Н. Волков // Транспортные системы. 2022. № 2 (24). С. 22-31.
16. Волков, А.Н. Особенности формы корпуса рыболовного траулера / А.Н. Волков, В.В. Князьков // Будущее технической науки. Сборник материалов XXI молодежной научно-технической конференции, посвященной 105-летию Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 2022. С. 267-269.
17. Князьков, В.В. SolidWorks. Проектирование судов: учеб. пособие / В.В. Князьков; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2018. – 228 с.
18. Князьков, В.В. Определение основных элементов водоизмещающих судов: учеб. пособие / В.В. Князьков; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2023. – 168 с.
19. Волков, А.Н. Технические характеристики рыболовных траулеров / Свидетельство о регистрации базы данных № 2022622135, 2022.