Проектирование и конструкции судов

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-4>
УДК 629.562

В.Г. Бугаев, Дам Ван Тунг, Ю.В. Бондаренко

БУГАЕВ ВИКТОР ГРИГОРЬЕВИЧ – д.т.н., профессор, ORCID 0000-0001-8778-620X,
e-mail: v_bugaev@mail.ru
ДАМ ВАН ТУНГ – аспирант, e-mail: damvantung@mail.ru
БОНДАРЕНКО ЮЛИЯ ВАЛЕРЬЕВНА – аспирант, e-mail: Julia_Bond1993@mail.ru
Кафедра кораблестроения и океанотехники Инженерной школы
Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Россия

Оптимизация формы корпуса рыболовных судов

Аннотация: При проектировании судна на выбор формы его корпуса влияют тип и назначение судна, многолетний эксплуатационный и инженерный опыт, результаты научных исследований и т.п. Как показывает практика, численные методы исследования имеют явные преимущества (по стоимости и срокам проведения) по сравнению с экспериментальными, суть которых – отработка, например обводов корпуса судна «методом проб и ошибок». По мнению авторов статьи, близкий к экспериментальному метод численного моделирования – весьма удобен при проектировании формы корпуса. В данной работе представлены результаты оптимизации формы корпуса рыболовного судна с помощью численных методов, которые позволяют определить не только наилучшие параметры формы корпуса с точки зрения минимума сопротивления, но и обеспечить требования, предъявляемые к элементам поверхности корпуса.

Ключевые слова: оптимизация формы корпуса, рыболовные суда, сопротивление воды.

Введение

Высокая сложность и стоимость рыболовных судов, множество допустимых проектных решений, противоречивость отдельных качеств, большой объем информации и требования высокой экономической эффективности и безопасности плавания предопределили необходимость использования при их проектировании не только автоматизированных систем, но и методов их анализа и оптимизации [5, 6]. Для подобных исследований применение экспериментальных и численных методов актуально и эффективно [1, 3, 4].

Экспериментальный подход, оставаясь наиболее точным и надежным, обладает высокой стоимостью и трудоёмкостью его проведения [1]. Численные методы по сравнению с экспериментальными не только имеют преимущества по времени и стоимости, но позволяют проводить оптимизацию формы корпуса и винто-рулевого комплекса, что дает возможность существенно увеличить количество рассматриваемых вариантов и повысить качество принимаемых решений в задачах автоматизированного проектирования [1, 2, 9–11].

На начальных стадиях проектирования судов использование численных методов позволяет формировать оригинальные технические задачи и разрабатывать оптимизационные математические модели для их реализации [1, 2]. Поэтому эти методы, по нашему мнению, – лучший выбор для оптимизации формы корпуса современных рыболовных судов, различия во внешнем облике которых свидетельствуют о наличии многочисленных и противоречивых требований и критериев оптимальности при их проектировании [5, 6].

Цель исследования – с помощью численных методов выполнить оптимизацию формы корпуса рыболовного судна, при которой выполняются требования, предъявляемые к элементам поверхности, с целью обеспечения его эффективности и безопасности плавания.

Для этого нам необходимо решить следующие задачи:

- создать гибкую в управлении 3D-модель поверхности корпуса судна, позволяющую генерировать и проводить анализ формы корпуса в широком диапазоне значений варьируемых параметров и элементов;
- определить параметры формы корпуса судна, в наибольшей степени влияющие на сопротивление, обтекание корпуса потоками воды, формирование пограничного слоя и спутного следа;
- выполнить оптимизацию формы корпуса судна по критерию минимум сопротивления, провести сравнение результатов численного моделирования с результатами аналитических вычислений;
- определить влияние формы бульба на сопротивление судна и условия обтекания его носовой и кормовой оконечностей;
- сформулировать рекомендации для дальнейших исследований в области оптимизации формы корпуса в задачах автоматизированного проектирования судов.

Решение задачи осуществляется с помощью программного обеспечения Simulation и FlowSimulation SolidWorks.

В силу большого количества параметров и противоречивого характера их влияния на сопротивление, а также сложности анализа результатов исследований целесообразно общую задачу разделить на две задачи. Первую задачу можно сформулировать следующим образом: необходимо определить размеры $X_k (L, B, T, x_{шнс})$ корпуса судна, при которых водоизмещение имеет заданное (расчетное) значение D и выполняются требования, предъявляемые к элементам поверхности судна (без учета сопротивления воды). Решение этой задачи позволяет сформировать область, состоящую из вариантов с заведомо приемлемыми элементами, но не всегда наилучшими с точки зрения ходкости. Вторая задача посвящена выбору из совокупности допустимых вариантов наилучших с точки зрения ходкости с одновременной оптимизацией формы носовой (формы бульба) и кормовой оконечностей. Такое решение задачи позволяет, с одной стороны, значительно уменьшить её размерность и сократить время расчетов, с другой – уделить больше внимания отработке наиболее проблемных участков поверхности с использованием инструментов визуализации.

Описание 3D-модели поверхности корпуса

В настоящее время рыболовные суда имеют весьма разнообразную форму корпуса. На рис. 1 представлены модели малого рыболовного траулера рефрижератора МРТР-30 и крабового судна (Pella PL-475).

В качестве прототипа (начального приближения) при создании поверхности корпуса проектируемого судна принят проект Pella PL-475 (рис. 2). Судно имеет плавные обводы без сломов и протяженных плоских участков, бульбовую носовую оконечность и транцевую корму.

В общем случае известными величинами являются элементы судна $X_k^* = (L, B, T, H, \alpha, \beta, \delta, x_c, z_c)$, найденные с помощью математической модели на верхнем подуровне проектирования. Расчетные значения элементов судна приведены в табл. 1. В качестве основного расчетного варианта загрузки выбран выход из района промысла с полным грузом и с количеством запасов, обеспечивающим осадку судна по грузовую ватерлинию (ГВЛ) [7, 8]. В процессе уточнения нагрузки, вместимости, компоновки, удифферентовки и т.д. с использованием CAD- и CAE-систем водоизмещение изменяется, поэтому поверхность корпуса должна быть гибкой для принятия компромиссных решений.

а

б

Рис. 1. Рыболовные суда:

а – модель малого рыболовного траулера рефрижератора МРТР-30 (<https://www.vympel-rybinsk.ru/vyimpel-budet-stroit-suda-dlya-ryibakov.html>; www.vympel-rybinsk.ru); б – модель краболова Pella PL-475 (<http://pellaship.ru/en/longliner/360.html>).

Таблица 1

Основные элементы судна

Элементы	Значения
Длина между перпендикулярами L , м	27,62
Ширина по ГВЛ B , м	7,16
Осадка по грузовой марке T , м	2,67
Высота борта H , м	3,49
Коэффициент полноты мидель-шпангоута β	0,85
Коэффициент общей полноты δ	0,562
Коэффициент полноты ГВЛ α	0,826
Отношение L/B	3,857
Отношение B/T	2,68
Площадь смоченной поверхности Ω , m^2	299,5
Водоизмещение D , т	305,7
Скорость v , уз	ок. 11

Рис. 2. Трехмерная модель поверхности корпуса проектируемого судна (начальное приближение). Здесь и далее – иллюстрации и табличные расчеты авторов.

Особенностью 3D-модели является возможность оптимизации поверхности корпуса судна с целью обеспечения требований, предъявляемых к водоизмещению, вместимости, положению центра величины и коэффициентам полноты мидель-шпангоута и грузовой ватерлинии по критерию минимум сопротивления.

В качестве варьируемых параметров при создании 3D-модели приняты:

- длина, ширина, осадка, высота борта;
- положение по длине шпангоута наибольшего сечения;
- углы конструктивного дифферента, килеватости, притыкания ГВЛ к ДП;
- длина (протяженность) и ширина (развитость) бульба, отстояние точки наибольшей длины бульба от основной плоскости.

Поверхность корпуса судна построена на основе формообразующих каркасных линий: килевой линии, мидель-шпангоута (шпангоута наибольшего сечения), форштевня, ахтерштевня, верхней палубы, грузовой ватерлинии, баланс-шпангоутов, ватерлинии на уровне наибольшей длины бульба (если таковой есть). Каркас поверхности создан в среде SolidWorks с использованием инструментов сплайна и β -сплайна (рис. 3).

**Рис. 3. 3D-модель поверхности корпуса судна:
а – каркасные линии; б – поверхность корпуса на фоне каркасных линий
и теоретических сечений.**

Мидель-шпангоут (шпангоут наибольшего сечения) имеет плавные обводы заданной формы и близкий к расчетному коэффициент полноты. Основными параметрами формы мидель-шпангоута являются углы килеватости днища и наклона борта. Для судов, имеющих конструктивный дифферент, килевой линии придается соответствующий угол наклона.

Форма носовой оконечности рыболовных судов имеет весьма разнообразную форму. Особое внимание уделяют форме ГВЛ и углу притыкания ГВЛ к ДП, форме шпангоутов, придавая им умеренную V-образную или U-образную форму, в зависимости от относительной скорости и с учетом ходкости, остойчивости и удифферентовки судна, а также всхожести на волну и интенсивности килевой качки. Исходными предпосылками для построения ГВЛ являются коэффициент полноты площади ГВЛ, положение шпангоута наибольшего сечения, форма носовой и кормовой ветвей ГВЛ, углы заострения в оконечностях. ГВЛ принимает слегка выпуклую, прямую или слегка вогнутую форму с углом притыкания $15 \div 30$ град. Управление формой носовой и кормовой оконечностей осуществляется с помощью баланс-шпангоутов. Особое внимание форме носового баланс-шпангоута следует уделить при наличии бульба. Размеры и форма верхней палубы определяются исходя из размещения на палубе рулевой рубки, устройств и оборудования для выполнения технологических операций.

Бульб имеет каплеобразную форму с возможностью его преобразования в среднерасположенный или подповерхностный клинообразный. Основными характеристиками бульба являются его протяженность, развитость и форма. В нашем примере размеры и форма бульба в большей степени определяется его удлинением l_b , шириной в плоскости носового перпендикуляра b_b и положением точки наибольшей длины по высоте h_b (рис. 4).

Выбор формы кормовой оконечности осуществляется из соображений снижения сопротивления воды движению судна и взаимодействия винто-рулевого комплекса с корпусом. V-образные шпангоуты уменьшают сопротивление, а U-образные, создавая более равномерное поле скоростей в диске винта, улучшают взаимодействие винто-рулевого комплекса с корпусом. Следовательно, при создании 3D-модели поверхности корпуса, следует отдать предпочтение умеренно V-образным и U-образным шпангоутам. В районе ГВЛ шпангоутам придают U-образный характер со значительным развалом бортов. Это связано с обеспечением остойчивости и размещением помещений, оборудования и грузов. Наличие транца дает определенные экономические и эксплуатационные преимущества. В то же время погруженный транец может увеличивать сопротивление, что связано с отрывом пограничного слоя на концах транца.

Созданный каркас позволяет построить гладкую поверхность корпуса судна, в полной мере соответствующую расчетным значениям элементов судна и позволяющую выполнить оптимизацию формы корпуса с целью обеспечения требований, предъявляемых к элементам судовой поверхности.

Рис. 4. Форма носовой оконечности:
а – теоретические сечения поверхности корпуса;
б – форма и размеры бульба.

На рис. 5 приведены поверхности, созданные с помощью аффинного преобразования (масштабирования), как иллюстрация простого способа перестроения поверхности.

Рис. 5. Результаты масштабирования (аффинного преобразования):
x = 0,75; y = 1; z = 1 (а); x = 0,75; y = 1; z = 1,25 (б).

Большое количество варьируемых параметров способствует гибкому управлению поверхностью корпуса, но усложняет решение оптимизационной задачи и анализ полученных результатов.

Задача 1. Необходимо определить такие параметры (размеры) поверхности корпуса $X_k(L, B, T, x_{\text{шнс}})$, при которых водоизмещение судна имеет искомое расчетное значение D и выполняются требования, предъявляемые к элементам судна (без учета сопротивления воды).

Удлинение (протяженность) l_b , ширина (развитость) b_b и высота бульба (точки наибольшей длины бульба) h_b , приняты постоянными на уровне средних значений:

удлинение (протяженность) бульба, $l_b = 1,2$ м;

ширина бульба, $b_b = 1,6$ м;

высота бульба (точки наибольшей длины бульба), $h_b = 1,2$ м.

Варьируемые параметры X_k и граничные условия:

длина между перпендикулярами, $27,22 \leq L \leq 28,02$, $\Delta L = 0,2$ м;

ширина по ГВЛ, $6,76 \leq B \leq 7,56$, $\Delta B = 0,2$ м;

осадка по ГВЛ, $2,61 \leq T \leq 2,71$, $\Delta T = 0,02$ м;

высота ВП, $3,5 \leq H \leq 3,55$, $\Delta T = 0,05$ м;

положение шпангоута наибольшего сечения, $-0,6 \leq x_{\text{шнс}} \leq -0,3$, $\Delta x_{\text{шнс}} = -0,3$ м.

Ограничения:

абсцисса центра величины, $-0,41 \geq x_c \geq -0,51$ м;

аппликата центра величины, $1,66 \geq y_c \geq 1,56$ м;

вместимость судна, $W(X_k) \geq 440$ м³.

Цель (критерий): искомое значение водоизмещения по ГВЛ, $D = 305,7$ т.

Как было сказано выше, решение первой задачи позволяет сформировать совокупность вариантов поверхности корпуса судна с водоизмещением, наиболее близким к расчетному. В табл. 2 приведен неполный перечень вариантов, удовлетворяющих перечисленным выше требованиям. Каждый из вариантов может стать оптимальным с учетом всех требований, предъявляемых к судну, и иметь минимальное сопротивление. Для дальнейших исследований выбраны 5 вариантов (табл. 2).

Таблица 2

Результаты оптимизации (задача 1)

		Оптимальный (88)	Сценарий 67	Сценарий 88	Сценарий 110	Сценарий 174	Сценарий 195
Длина между ПП, L		27.62м	27.42м	27.62м	28.02м	27.82м	28.02м
Ширина по ГВЛ, В		7.16м	7.36м	7.16м	6.96м	7.56м	7.36м
Осадка по ГВЛ, Т		2.67м	2.65м	2.67м	2.69м	2.61м	2.63м
Высота ВП, Н		3.5м	3.5м	3.5м	3.5м	3.55м	3.55м
Положение ШНС, Хшнс		-0.3м	-0.3м	-0.3м	-0.3м	-0.3м	-0.3м
Абсцисса центра величины, Хс	(-0.51м ~ -0.41м)	-0.47м	-0.49м	-0.43м	-0.45м	-0.47м	-0.46м
Апplikата центра величины, Ус	(1.56м ~ 1.66м)	1.62м	1.61м	1.62м	1.63м	1.60м	1.61м
Вместимость, W	>440 м³	445.7 м³	452.6 м³	445.7 м³	440.6 м³	462.1 м³	460.2 м³
Водоизмещение, D	точно равно 305.7 т	305.7 т	306.5 т	305.7 т	306.1 т	305.9 т	305.8 т

Задача 2. Необходимо определить такие параметры (размеры) бульба $X_k (l_b, b_b, h_b)$, при которых судно имеет минимальное сопротивление $R(X_k) \rightarrow \min$ и выполняются требования, предъявляемые к вместимости, остойчивости и посадке.

Длина между перпендикулярами L, ширина по ГВЛ В, осадка по ГВЛ Т и положение шпангоута наибольшего сечения $x_{шнс}$ для каждого варианта в процессе решения задачи 2 не изменяются и принимаются на уровне задачи 1.

Варьируемые параметры X_k и граничные условия:

удлинение (протяженность) бульба, $0,8 \leq l_b \leq 1,4$, $\Delta l_b = 0,2$ м;

ширина бульба, $1,3 \leq b_b \leq 1,9$, $\Delta b_b = 0,2$ м;

высота бульба (точки наибольшей длины бульба), $1,1 \leq h_b \leq 1,4$, $\Delta h_b = 0,1$ м.

Ограничения:

водоизмещения по ГВЛ, $305,7 \leq D \leq 309,0$ т;

вместимость, $W(X_k) \geq 440$ м³.

Цель (критерий): минимальное сопротивление $R(X_k) \rightarrow \min$.

Основными проблемами при решении задач гидродинамики численными методами являются точность модели (соответствие реальному объекту) и исходной информации, а также размеры сетки.

Точность и гибкость модели, на наш взгляд, обеспечивается использованием сплайновой математики с широкими возможностями управления формой корпуса. Сплайн управляется не только положением точек на кривой или точек многоугольника, но и длиной и направлением касательных в конечных точках, что существенным образом изменяет характер кривой.

Точность исходной информации. Тип течения: ламинарное и турбулентное. Шероховатость – 150 мкм, скорость набегающего потока – 6 м/с ($Fr \approx 0,33$). Расчетная область выбрана из соображений минимизации воздействия внешних граничных условий на картину обтекания корпуса судна.

Размеры сетки. На начальном этапе решения задачи 2 размеры базовой сетки (количество ячеек по осям X, Z и Z) устанавливаются в автоматическом режиме, исходя из условия сходимости целей. На последующих этапах при окончательной отработке формы корпуса и бульба осуществляется адаптация (разбиение) сетки в процессе расчета в областях с особенностями течения (в носовой и кормовой оконечностях) для обеспечения установленной точности результатов.

Размеры базовой сетки: количество ячеек по оси X – $68 \div 284$; количество ячеек по оси Y – $18 \div 71$; количество ячеек по оси Z – $34 \div 142$. Всего количество ячеек – от 41541 до 2863288. Сеточная независимость наступает при наличии сетки в 2,5 миллиона ячеек.

Результаты оптимизации формы корпуса судна в однородном потоке представлены в табл. 3. Наилучшим с точки зрения ходкости является вариант, выделенный в табл. 2 зеленым цветом. На рис. 6 показаны картины обтекания корпуса судна после оптимизации.

Таблица 3

Результаты оптимизации (задача 2)

Цель	Оптимум 1	эксперимент 43	эксперимент 86	эксперимент 167	эксперимент 231	эксперимент 282
Длина между ПП, L [м]	27.82	27.42	27.62	28.02	27.82	28.02
Ширина по ГВЛ, B [м]	7.56	7.36	7.16	7.36	7.56	6.96
Осадка по ГВЛ, T [м]	2.61	2.65	2.67	2.63	2.61	2.69
Высота ВП, H [м]	3.55	3.5	3.5	3.55	3.55	3.5
Положение ШНС, Xшнс [м]	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
Длина бульба, lб [м]	1	1.2	1	1.2	1	1
Ширина бульба, bб [м]	1.5	1.7	1.5	1.5	1.5	1.7
Высота бульба, hб [м]	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2
Коэффициент общей полноты, []	0.543	0.559	0.565	0.550	0.543	0.569
Вместимость, W [м ³]	461.2	452.3	445.7	460.1	461.2	440.6
Водоизмещение судна, D [т]	305.7	306.2	305.7	305.7	305.7	306.1
Сопротивление в Solidworks, R1 [кН]	31.54	33.08	36.19	32.83	31.54	34.76
Сопротивление по Ерошину R2 [кН]	33.51	34.4	35.21	33.17	33.51	34.62

Результаты расчетов сопротивления воды движению судна (табл. 3), выполненные численными методами (R1), достаточно хорошо согласуются с расчетами по методу В.А. Ерошина (R2), при скорости движения 6 м/с для оптимального варианта сопротивление воды меньше на 6%. Для остальных вариантов расчетное сопротивление по методу В.А. Ерошина (R2) больше сопротивления R1, что, на наш взгляд, можно объяснить, с одной стороны, отсутствием в данном методе параметров, учитывающих наличие бульба, с другой – большей точностью и чувствительностью численных методов к изменению поверхности корпуса.

На рис. 6 достаточно четко просматриваются зоны повышенного давления и изменения скорости потока жидкости, которые приводят к образованию носовой и кормовой групп волн. В носовой оконечности происходит формирование подпорной волны и сложение расходящихся волн, менее заметно образование поперечных волн в силу незначительной скорости движения судна. В кормовой оконечности одновременно с образованием расходящихся и поперечных волн появляется попутный поток, который в районе сужения корпуса отрывается от него, создавая полосу завихрений (рис. 6, б).

а

б

Рис. 6. Диаграммы: а – объемной концентрации воды в плоскости ГВЛ; б – скорости потока в плоскости ГВЛ.

На рис. 7 изображена картина распределения давления и линий обтекания корпуса судна в носовой и кормовой оконечностях, в районе мидель-шпангоута дополнительно показан пограничный слой.

Рис. 7. Картина давлений и линий обтекания корпуса судна:
а – в кормовой оконечности; б – в районе МШ (дополнительно показан пограничный слой);
в – в носовой оконечности.

Максимальный эффект от оптимизации бульба (5–6%) по сравнению с начальным вариантом ($l_b = 1,2$ м, $b_b = 1,6$, $h_b = 1,2$ м) достигается при $l_b = 1,0$ м, $b_b = 1,5$, $h_b = 1,3$ м, однако на практике часто применяются бульбы, близкие к оптимальным, но удобные с точки зрения маневренности и эффективности в эксплуатации.

Особый интерес представляет анализ околооптимальной области и влияния размеров и формы бульба на сопротивление. На рис. 8 приведены поверхности отображающие:

влияние длины l_b и высоты h_b бульба на сопротивление судна, ширина бульба $b_b = 1,5$ м (рис. 8, а);

влияние длины l_b и ширины b_b бульба на сопротивлении судна, высота бульба $h_b = 1,3$ м (рис. 8, б);

влияние высоты h_b и ширины b_b бульба на сопротивлении судна, длина бульба $l_b = 1,0$ м (рис. 8, в).

Рис. 8. Зависимость сопротивления судна от параметров формы бульба:
а – длины l_b и высоты h_b (при $b_b = 1,5$ м); б – длины l_b и ширины b_b (при $h_b = 1,3$ м);
в – высоты h_b и ширины b_b (при $l_b = 1,0$ м).

Результаты, их обсуждение

1. Оценивая влияние длины l_b и высоты h_b бульба на сопротивление судна (при $b_b = 1,5$ м) (рис. 8, а) можно сделать следующий вывод. Смещение центра объема бульба вверх или вниз (изменение h_b в пределах от 1,1 до 1,4 м) от оптимального значения (при $h_b = 1,3$ м и $l_b = 1,0$ м) приводит к увеличению сопротивления на 2,2÷5,6% соответственно. При увеличении либо уменьшении длины бульба l_b по сравнению с оптимальным – сопротивление увеличивается на 2,3÷4,9%.

Смещение центра объема бульба в нос и в прикилевую область позволяет заострить ватерлинии в районе ГВЛ и тем самым уменьшить размеры носовой подпорной волны. Одновременно с этим уменьшается интенсивность перетока воды к днищу и образование скуло-

вых вихрей, что делает обтекание корпуса более плавным. Смещение же центра объема бульба вверх приводит к благоприятной интерференции волн, однако существенных преимуществ при $b_6 = 1,5$ м не даёт, что наглядно видно на эпюре сопротивления (рис. 8, а).

2. Влияние длины l_6 и ширины b_6 бульба на сопротивление судна ($h_6 = 1,3$ м) (рис. 8, б). При любых изменениях длины l_6 и ширины b_6 бульба в пределах граничных условий происходит увеличение сопротивления до 8,4% (точка $l_6 = 0,8$ м, $b_6 = 1,3$ м), за исключением точки с координатами $l_6 = 1,2$ м, $b_6 = 1,5$ м, в которой происходит локальное уменьшение сопротивления на 0,5%.

3. Влияние высоты h_6 и ширины b_6 бульба на сопротивление судна ($l_6 = 1,0$ м) (рис. 8, в). Положительное влияние бульба (в околооптимальной области) достигается за счет благоприятной интерференции волн, создаваемых бульбом и корпусом судна, приводящей к уменьшению волнового сопротивления, что достаточно иллюстративно представлено на рис. 8, в. Для таких судов характерны каплеобразные бульбы. Отклонение высоты h_6 и ширины b_6 бульба в ту или иную сторону приводит к достаточно большому увеличению сопротивления (до 8,5%).

4. Близкая к лыжеобразной форма кормовой оконечности с умеренно U-образными шпангоутами делает линии тока параллельными батоксам и улучшает подток воды к винту. Следует отметить, что форма бульба мало влияет на обтекание корпуса судна в кормовой оконечности и, следовательно, на её сопротивление. Однако это заключение неоднозначно, касается рассматриваемого судна и требует дополнительных исследований. В действительности влияние формы и размеров бульба на сопротивление и маневренность судна более сложно и зависит от многих факторов, в том числе от особенностей эксплуатации на промысле.

К недостаткам судна с бульбом относятся увеличение стоимости корпуса и сопротивления при движении в балласте, снижение управляемости.

Заключение

Результаты оптимизации позволяют определить не только наилучшие с точки зрения сопротивления параметры формы корпуса, но и провести детальный анализ решений, которые невозможно строго описать математически и дорого реализовать на физических моделях. К таковым относятся выбор углов притыкания ГВЛ к ДП, углов килеватости и конструктивного дифферента, степени V-образности или U-образности шпангоутов в оконечностях и др.

В силу большого количества информации численного и визуального характера процесс принятия окончательного решения превращается в сложную научно-техническую проблему, связанную с обеспечением не только ходкости, но и остойчивости, удифферентовки и т.д. в различных вариантах загрузки.

Внедрение численных методов гидродинамики в процесс проектирования существенно облегчает и ускоряет решение задач оптимизации поверхности корпуса судна и сдвигает проведение испытаний в бассейне на более поздние этапы проектирования. Строго говоря, выбор формы корпуса судна необходимо выполнять с учетом его взаимодействия с винторулевым комплексом, маневренности и компоновки, что является весьма сложной задачей и предметом наших дальнейших исследований.

Вклад авторов в статью: В.Г. Бугаев – постановка задачи, создание 3D-модели, выполнение расчетов и анализ результатов; Дам Ван Тунг – выполнение расчетов, анализ результатов, оформление; Ю.В. Бондаренко – анализ отечественных и зарубежных источников, перевод источников, анализ результатов, оформление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Петров А.С., Печенюк А.В., Станков Б.В. Программный комплекс FlowVision как современный инструмент проектирования судовых обводов // Судостроение. 2013. № 4. С. 54–58. URL: http://www.sstc.spb.ru/upload/iblock/d09/2013_4.pdf (дата обращения: 20.01.2020).

2. Лаврищева Л.С., Новоселов В.Н. Оптимизация формы модели гребного винта в однородном потоке // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. № S1. С. 75–83. URL: <http://transactions-ksrc.ru/upload/pdf/spec2018/75-83.pdf> (дата обращения: 06.02.2020).
3. Лобанов В.А. Численная оценка ледовых качеств судна. Ходкость // Вестник научно-технического развития. 2012. № 1. С. 18–34. URL: <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=619> (дата обращения: 26.02.2020).
4. Махин В.П., Страшко А.Н. Математическое моделирование движения судов во льдах // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 2(30). С. 1–11. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-1-11
5. Печенюк А.В. Оптимизация судовых обводов для снижения сопротивления движению // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9, № 1. С. 57–65. DOI: 10.20537/2076-7633-2017-9-57-65
6. Печенюк А.В., Станков Б.Н., Оптимизация судовых обводов: новые возможности // Судостроение. 2015. № 3(820). С. 15–19. URL: <http://www.digitalmarine.net/builder/20150812.pdf> (дата обращения: 20.01.2020).
7. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов: в 5 ч. Ч. 2. Корпус // Российский морской регистр судоходства. СПб., 2017. 229 с. URL: <https://-meganorm.ru/Data2/1/4293751/4293751008.pdf> (дата обращения: 06.02.2020).
8. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки малых морских рыболовных судов // Российский морской регистр судоходства. СПб., 2020. 215 с. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules> (дата обращения: 06.02.2020).
9. Таранов А.Е., Сайфуллин Т.И., Рудниченко А.А., Егоров С.В. Особенности использования численного моделирования при проектировании объектов морской техники // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2018. Т. 386, № 4. С. 28–40. URL: <http://transactions-ksrc.ru/upload/pdf/386/28-40.pdf> (дата обращения: 26.02.2020).
10. Яковлев А.Ю., Орлов О.П., Ачкинадзе А.Ш., Бородай И.К., Родионов А.А. Численное исследование движителей с гребными винтами-тандем в насадке // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2018. Т. 386, № 4. С. 50–55. URL: <http://transactions-ksrc.ru/upload/pdf/386/50-55.pdf> (дата обращения: 20.01.2020).
11. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. Cambridge, GB, Univ. Press, 2011, 544 p. URL: <http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/188555> – 26.02.2020.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 2/43

Ship Design and Construction

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-4>

Bugaev V., Dam Van Tung, Bondarenko Yu.

VIKTOR BUGAYEV, Doctor of Engineering Sciences, Professor,

ORCID 0000-0001-8778-620X, e-mail: v_bugaev@mail.ru

DAM VAN TUNG, Postgraduate, e-mail: damvantung@mail.ru

YULIA BONDARENKO, Postgraduate, e-mail: Julia_Bond1993@mail.ru

Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, School of Engineering

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Fishing vessels hull shape optimization

Abstract: When designing a vessel, the particular hull shape is selected depending on the type and purpose of the vessel, as well as on the longstanding operational and engineering experience, research results, etc. As evidenced in practice, numerical methods of research are obviously more preferable (in

terms of costs and time) compared to experimental methods mainly based on pilot testing – for instance, selection of proper shape of the vessel's hull using the trial and error method. According to the authors of the article, the method of numerical modeling quite close to the experimental one is very convenient for hull shape design. This paper covers the results of optimizing the hull shape of a fishing vessel using numerical methods which can not only determine the best parameters of the hull shape from the point of minimal resistance, but can also ensure that all requirements for the elements of the surface of the hull are properly met.

Keywords: hull shape optimization, fishing vessels, water resistance.

REFERENCES

1. Aksenov A., Yuluktov S., Petrov A., Pechenyuk A., Stankov B. Program Complex FlowVision as a modern tool for designing shipby. *Shipbuilding*. 2013(4):54–58.
URL: http://www.sstc.spb.ru/upload/iblock/d09/2013_4.pdf - 20.01.2020.
2. Lavrisheva L., Novoselov V. Propeller model shape optimization in uniform flow. *Transactions of the Krylov State Research Center*. 2018(S1):75–83.
URL: <http://transactions-ksrc.ru/upload/-pdf/spec2018/75-83.pdf> – 06.02.2020.
3. Lobanov V.A. Numerical assessment of the ice qualities of the vessel. Propulsive quality. *Bulletin of Scientific and Technological Development*. 2012(1):18–34.
URL: <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=619> – 26.02.2020.
4. Makhin V.P., Strashko A.N. Mathematical modeling of the movement of ships in ice. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2015(30):1–11.
DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-1-11
5. Pechenyuk A.V. Optimization of a hull form for decrease ship resistance to movement. *Computer Research and Modeling*. 2017;9(1):57–65. DOI: 10.20537/2076-7633-2017-9-57-65
6. Pechenyuk A.V., Stankov B.N. Optimization of ship's contours: new opportunities, *Shipbuilding*, 2015;820(3):15–19. URL: <http://www.digitalmarine.net/builder/20150812.pdf> – 20.01.2020.
7. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the classification and construction of ships, In 5 parts. Part 2. Housing. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2017, 229 p.
URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293751/4293751008.pdf> – 06.02.2020.
8. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the classification and construction of small marine fishing vessels. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2020, 215 p.
URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules> – 06.02.2020.
9. Taranov A., Sayfullin T., Rudnichenko A., Egorov S. Application specifics of numerical simulation in design of marine structures. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2018;386(4): 28–40. URL: <http://transactions-ksrc.ru/upload/pdf/386/28-40.pdf> – 26.02.2020.
10. Yakovlev A., Orlov O., Achkinadze A., Boroday I., Rodionov A. Numerical studies of propulsors with nozzled tandem propellers. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2018; 386(4):50–55. URL: <http://transactions-ksrc.ru/upload/pdf/386/50-55.pdf> – 20.01.2020.
11. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. Cambridge, GB, Univ. Press, 2011, 544 p.
URL: <http://eprints.soton.ac.uk/id/-eprint/188555> – 26.02.2020.