DOI [https://doi.org/10.15589/znp2020.1\(479\).2](https://doi.org/10.15589/znp2020.1(479).2)
УДК 629.5.01

HULL CONTOURS CREATION AND ESTIMATION OF RUNNING CHARACTERISTICS OF NEW GENERATION RIVER-SEA CRUISE PASSENGER SHIPS

СОЗДАНИЕ ОБВОДОВ И ОЦЕНКА ХОДОВЫХ КАЧЕСТВ КРУИЗНЫХ ПАССАЖИРСКИХ СУДОВ СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

СТВОРЕННЯ ОБВОДІВ ТА ОЦІНКА ХОДОВИХ ЯКОСТЕЙ КРУЇЗНИХ ПАСАЖИРСЬКИХ СУДЕН ЗМІШАНОГО ПЛАВАННЯ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Alexander G. Egorov
egorovag@mcb.com.ua
ORCID 0000-0002-2050-8640

А. Г. Егоров,
канд. техн. наук, с. н. с.

Marine Engineering Bureau, Odesa
Морское Инженерное Бюро, г. Одесса
Морське Інженерне Бюро, м. Одеса

Abstract. Purpose – estimation of running characteristics of river-sea passenger ships (PS) of new generation. **Methodology.** Methods of ship theory and design, analysis and statistical processing are applied. **Results.** Satisfactory convergence of the results of model and full-scale seaworthy trials on the example of “BBC max” class PS shows effectiveness of used tools. **Scientific novelty.** For the first time, systematic study of running characteristics of new generation PS of various classes and architectural-structural types has been performed. **Practical impact.** Main projects of new generation river-sea passenger ships are presented: “PostDnipro max”/“Volgo-Balt” max (dimensions are determined by conditions of Volga-Baltic Way or Dnieper River, passenger capacity is about 500 pax, project PV500); “Dnipro max”/“Volgo-Don” max (dimensions are determined by way conditions of Volga-Don shipping channel or Dnieper river with taking into account optimization of sailing area, passenger capacity is about 250–350 pax, projects PV300, PV300VD, PV250); “Danube Max” (dimensions are determined by way conditions of Danube River and inter-basin Danube–Main–Rhine junction, passenger capacity is about 200 pax, project PV200D); “BBC max” (dimensions are determined by way conditions of Belomor-Baltic Canal, passenger capacity is about 150–200 pax, projects PV09, PV11, PV150, PV200BB). Features of their contours are highlighted in comparison with classical Soviet period ships. For our operational conditions traditional single hull type of passenger ship is most suitable. Ships differ from classic PS projects built in Soviet time, with the L/B ratio – for the most part (“Dnipro max”/“Volgo-Don” max and “PostDnipro max”/“Volgo-Balt max” classes) are longer, by contours of fore and aft ends – optimized with computational fluid dynamics (CFD) methods, and also designed with taking into account installation of bow thrusters and rudder-propellers respectively. Results of research of running characteristics of new generation PS, which were executed by CPD methods are shown. Information of 2019 full-scale seaworthy tests of new generation PV09 concept PS of “BBC max” class is also presented and analyzed.

Key words: river-sea cruises; ship design; propulsion complex; model and full-scale trials; ecology; efficiency.

Анотація. Мета – оцінка ходових якостей пасажирських суден змішаного плавання (ПС) нового покоління. **Методика.** Застосовано методи теорії і проектування корабля, аналізу і статистики. **Результати.** Задовільна збіжність результатів модельних і натурних морехідних випробувань на прикладі ПС «ББК макс» класу показує ефективність застосовуваних інструментів. **Наукова новизна.** Вперше виконано системні дослідження ходових якостей ПС нового покоління різних класів і архітектурно-конструктивних типів. **Практичне значення.** Наведено основні проекти круїзних пасажирських суден змішаного плавання нового покоління: «ПостДніпро макс»/«Волго-Балт макс» (розміри визначаються умовами Волго-Балтійського шляху або річки Дніпро, пасажиромісткість приблизно 500 осіб, проект PV500); «Дніпро макс»/«Волго-Дон макс» (розміри визначаються шляховими умовами Волго-Донського судноплавного каналу або річки Дніпро з урахуванням оптимізації за районом плавання, пасажиромісткість приблизно 250–350 осіб, проекти PV300, PV300VD, PV250); «Дунай макс» (розміри визначаються шляховими умовами річки Дунай і міжбасейнового з'єднання Дунай-Майн-Рейн, пасажиромісткість приблизно 200 осіб, проект PV200D); «ББК макс» (розміри визначаються

шляховими умовами Біломорсько-Балтійського каналу, пасажиромісткість приблизно 150–200 осіб, проекти PV09, PV11, PV150, PV200BB). Підкреслено особливості їх обводів порівняно з класичними суднами радянського періоду. Для наших умов експлуатації найбільш відповідним є традиційний монокорпусний тип пасажирського судна. Судна відрізняються від класичних проектів ПС, побудованих за радянських часів, співвідношенням L/B – здебільшого («Дніпро макс»/«Волго-Дон макс» і «ПостДніпро макс»/«Волго-Балт макс» класи) довші, обводами носових і кормових країв – оптимізовані за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки (ОГД), а також спроектовані з урахуванням установаження підрулюючих пристроїв і гвинту-рульових колонок відповідно. Показані результати досліджень ходових якостей ПС нового покоління, виконаних за допомогою методів ОГД. Наведено і проаналізовано також дані натурних морехідних випробувань 2019 року ПС нового покоління «ББК макс» класу концепту PV09.

Ключові слова: ріка-море круїзи; проектування судна; пропульсивний комплекс; модельні та натурні випробування; екологія; ефективність.

Аннотация. Цель – оценка ходовых качеств пассажирских судов смешанного плавания (ПС) нового поколения. **Методика.** Применены методы теории и проектирования корабля, анализа и статистики. **Результаты.** Удовлетворительная сходимость результатов модельных и натурных мореходных испытаний на примере ПС «ББК макс» класса показывает эффективность применяемых инструментов. **Научная новизна.** Впервые выполнены системные исследования ходовых качеств ПС нового поколения различных классов и архитектурно-конструктивных типов. **Практическое значение.** Приведены основные проекты круизных пассажирских судов смешанного плавания нового поколения. Подчёркнуты особенности их обводов по сравнению с классическими судами советского периода. Показаны результаты исследований ходовых качеств ПС нового поколения, выполненных с помощью методов ВГД. Приведены и проанализированы также данные натурных мореходных испытаний 2019 года ПС нового поколения «ББК макс» класса концепта PV09.

Ключевые слова: река-море круизы; проектирование судна; пропульсивный комплекс; модельные и натурные испытания; экология; эффективность.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Новое поколение круизных пассажирских судов смешанного и речного плавания значительно отличается от классических речных и модернизированных до смешанного класса круизных пассажирских судов как по своему техническому оснащению, так и концептуально – другие подходы к определению главных

размерений, обводов, формированию пассажирских и общественных помещений [1–6].

Применение принципа максимального использования габаритов внутренних водных путей, для которых проектируется судно, а также внедрение новых пропульсивных комплексов (винто-рулевые колонки – ВРК и азимутальные [7–9], винт с поворотным симметричным двухсторонним рулем (“gate rudder” система) [10], колёсные движительно-рулевые – ДРК [11], см. рисунок 1) по аналогии с грузовыми судами [12] привели к необходимости создания новых эффективных обводов. При этом сами обводы создаются и оптимизируются в программных комплексах, которых просто не существовало на момент проектирования существующих ныне ПС.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ И ВЫДЕЛЕНИЕ НЕ РЕШЕННЫХ РАНЕЕ ЧАСТЕЙ ОБЩЕЙ ПРОБЛЕМЫ

В литературе отсутствуют системные исследования ходовых качеств круизных пассажирских судов смешанного плавания нового поколения. Приведены данные по исследованиям определённых судов [6; 13–16].

Обводы и ходовые качества судна непосредственно влияют на экономику и эффективность судна в эксплуатации, поэтому крайне важным является получить возможность качественной оценки ходовых качеств ПС нового поколения на этапе проектирования.

Рис 1. Современные пропульсивные комплексы, которые могут быть использованы на ПС нового поколения: а) ВРК VETH VZ-900A [8], б) ВРК STP 310 [9], в) “Gate rudder” система [10], г) колёсный ДРК Е.В. Фальмонова

Целью исследования является оценка ходовых качеств ПС нового поколения, разработанных Морским Инженерным Бюро.

МЕТОДЫ, ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Применялись методы теории и проектирования корабля, анализа и статистики. Объект – круизные ПС смешанного и речного плавания. Предмет – обводы и ходовые качества круизных ПС.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Разработанная Бюро линейка ПС нового поколения включает в себя все основные классы: «Пост-Днепр макс»/«Волго-Балт макс» (размеры определяются условиями Волго-Балтийского пути или реки Днепр, пассажировместимость около 500 человек, проект PV500); «Днепр макс»/«Волго-Дон макс» (размеры определяются путевыми условиями Волго-Донского судоходного канала или реки Днепр с учётом оптимизации района плавания, пассажировместимость около 250–350 человек, проекты PV300, PV300VD, PV250); «Дунай макс» (размеры определяются путевыми условиями реки Дунай и межбассейнового соединения Дунай–Майн–Рейн, пассажировместимость около 200 человек, проект PV200D); «ББК макс» (размеры определяются путевыми условиями Беломорско-Балтийского канала, пассажировместимость около 150–200 человек, проекты PV09, PV11, PV150, PV200BV).

Как было отмечено в [3], для наших условий эксплуатации наиболее подходящим является традиционный монокорпусный тип пассажирского судна.

Остановимся более детально на некоторых проектах:

- ПС проекта PV300VD «Днепр макс»/«Волго-Дон макс» класса;
- ПС проекта PV250 «Днепр макс»/«Волго-Дон макс» класса (пассажирский барже-буксирный состав);
- ПС проекта PV150 «ББК макс» класса (классические обводы и пропульсия);
- ПС проекта PV09 «ББК макс» класса (современные обводы и ВРК).

ПС проекта PV300VD – стальное самоходное трёхвинтовое (в первоначальном варианте на этапе строительства была выполнена замена на 3 ВРК) судно с наклонным форштевнем и транцевой кормовой оконечностью, с избыточным надводным бортом, с удлиненной надстройкой бака, надстройкой юта, со средним расположением четырёхъярусной надстройки, с носовым расположением рулевой рубки, с машинным отделением в кормовой части.

ПС проекта PV250 (пассажирский барже-буксирный состав) – стальное составное судно с избыточным надводным бортом, с надстройкой бака на основной секции, надстройкой юта на энергетической сек-

ции, со средним расположением трёхъярусной надстройки основной секции, с носовым расположением подъёмной (для обеспечения обзора) рулевой рубки на энергетической секции, с машинным отделением в кормовой части энергетической секции с 2 полноповоротными ВРК с гребными винтами в насадках. Корпус пассажирской секции имеет носовую оконечность с наклонным форштевнем и транцевую кормовую оконечность с упрощёнными обводами. Корпус энергетической секции имеет упрощённые обводы в носовой части, рассчитанные на совместное обтекание в составе с баржей-приставкой, и транцевую кормовую оконечность с неглубокими полутоннелями и скегом.

ПС проекта PV150 – стальное самоходное трёхвинтовое судно с наклонным форштевнем и транцевой кормовой оконечностью, с избыточным надводным бортом, с надстройкой бака и юта со средним расположением трёхъярусной надстройки с носовым расположением рулевой рубки, с машинным отделением в кормовой части.

ПС проекта PV09 – стальное самоходное судно с избыточным надводным бортом, с вертикальным форштевнем и транцевой кормовой оконечностью, со средним расположением двухъярусной надстройки, с носовым расположением рулевой рубки, с машинным отделением в кормовой части, с дизель-электрической энергетической установкой, с двумя полноповоротными ВРК и носовым подруливающим устройством.

Модельные испытания ПС нового поколения. Обводы ПС нового поколения создавались в программных комплексах Rhinoceros и CAESSES (Friendship Systems) и оптимизировались с помощью методов ВГД в среде FlowVision.

Моделирование буксировочных испытаний исследуемых ПС во FlowVision выполнено путём решения уравнений Рейнольдса конечно-объёмным методом в расчётной области, внутри которой помещена 3D модель корпуса судна. Расчёты выполнены в масштабе натуре с намерением избежать влияния масштабных эффектов и процедур пересчёта с модели на натуре, с учётом условий эксплуатации реальных судов [13–16].

Боковые виды ПС нового поколения приведены в таблице 1. Теоретические чертежи ПС нового поколения приведены в таблице 2.

Геометрические характеристики подводной части корпусов ПС нового поколения представлены в таблице 3.

Обводы моделей ПС нового поколения приведены на рисунках 2 и 3.

Результаты расчёта буксировочного сопротивления и мощности ПС нового поколения представлены в таблице 4, графически – на рисунке 4.

Визуализация расчётов для скорости 14 узлов (PV300, PV250, PV150) и 12,5 (PV09) представлена на рисунке 5.

Таблица 1. Боковые виды ПС нового поколения

Проекты	Боковые виды
PV300VD «Пётр Великий»
PV250
PV150
PV09 «Штандарт»

Таблица 2. Теоретические чертежи ПС нового поколения

Проекты	Теоретические чертежи
PV300VD «Пётр Великий»
PV250 (пассажирская секция)
PV250 (энергетическая секция)
PV150
PV09 «Штандарт»

Таблица 3. Геометрические характеристики корпусов ПС нового поколения

Наименование характеристики	Обозначение	Размерность	Значения				
			RV300VD	RV250		RV150	RV09
				Пассажирская секция	Энергетическая секция		
Длина по ватерлинии	L_{wl}	м	135,000	108,000	28,000	95,000	94,300
Длина наибольшая	L_{ol}	м	138,870	110,600	28,000	97,800	94,300
Ширина	B	м	16,600	16,600	16,600	16,200	13,000
Осадка на НП	T_F	м	2,900	2,500	2,500	1,400	1,800
Осадка на КП	T_A	м	2,900	2,500	2,500	1,400	1,800
Осадка на мидель-шпангоуте	T	м	2,900	2,500	2,500	1,400	1,800
Радиус скулы	R	м	0,950	0,950	0,950	0,950	0,700
Водоизмещение объёмное	C	м³	4902,1	3601,6	816,5	1548,4	1855,3
Водоизмещение весовое	Δ	т	5024,6	3601,6	816,5	1548,4	1855,3
Площадь смоченной поверхности	S	м²	2484,6	1943,0	569,6	1434,2	1391,4
Площадь ватерлинии	S_{wl}	м²	1966,5	1535,9	433,3	1292,9	1131,6
Площадь проекции на ДП	S_{cl}	м²	377,6	267,4	59,7	115,9	162,1
Площадь мидель-шпангоута	S_M	м²	47,8	41,1	41,1	22,3	23,2
Угол входа ватерлинии	i_F	град.	28,0	21,0	90,0	21,0	28,0
Абсцисса центра величины (от середины L_{wl})	x_C	м	-0,376	-9,347	3,586	-1,657	-0,230
Абсцисса центра величины относительная	I_{cr}	%	-0,28	-8,65	12,81	-1,74	-0,24
Погруженная площадь гранца	A_{TR}	м²	0,063	36,015	1,492	0,874	-
Абсцисса центра цилиндрической вставки (от середины L_{wl})	x_{rMB}	м	-3,000	-27,375	6,600	-7,500	-2,357
Длина цилиндрической вставки	L_{rMB}	м	51,000	52,750	5,200	30,000	61,295
Длина цилиндрической вставки относительная (L_{rMB}/L_{ol})	I_{rMB}	%	36,7	47,7	18,6	30,7	65,0
Коэффициент общей полноты	C_B	–	0,754	0,804	0,703	0,719	0,841
Коэффициент полноты площади ватерлинии	C_{wP}	–	0,878	0,857	0,932	0,840	0,923
Коэффициент полноты площади мидель-шпангоута	C_M	–	0,992	0,991	0,991	0,983	0,991
Коэффициент продольной полноты	C_P	–	0,760	0,811	0,709	0,731	0,848
Отношение длины к ширине	L_{wl}/B	–	8,133	6,506	1,687	5,864	7,254
Отношение ширины к осадке	B/T	–	5,724	6,640	6,640	11,571	7,222

Таблица 4. Буксировочное сопротивление и мощность ПС нового поколения

Параметр	Проект	V _с , узлы																
		6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14
F _n (число Фруда)	PV300VD	0,085	0,092	0,099	0,106	0,113	0,12	0,127	0,134	0,141	0,148	0,155	0,163	0,17	0,177	0,184	0,191	0,198
	PV250	0,084	0,091	0,098	0,106	0,113	0,12	0,127	0,134	0,141	0,148	0,155	0,162	0,169	0,176	0,183	0,19	0,197
	PV150	0,101	0,11	0,118	0,126	0,135	0,143	0,152	0,16	0,168	0,177	0,185	0,194	0,202	0,211	0,219	0,227	0,236
	PV09	0,111	0,115	0,122	0,131	0,138	0,144	0,151	0,158	0,164	0,173	0,183	0,192	0,201	0,21	0,219	0,228	0,237
	PV300VD	2,666	2,888	3,11	3,332	3,554	3,777	3,999	4,221	4,443	4,665	4,887	5,109	5,332	5,554	5,776	5,998	6,22
R _n · 10 ⁻⁸ (Число Рейнольдса)	PV250	2,689	2,914	3,138	3,362	3,586	3,81	4,034	4,258	4,482	4,707	4,931	5,155	5,379	5,603	5,827	6,051	6,275
	PV150	1,876	2,032	2,189	2,345	2,501	2,658	2,814	2,97	3,127	3,283	3,439	3,596	3,752	3,908	4,065	4,221	4,377
	PV09	1,834	1,975	2,112	2,340	2,491	2,621	2,782	2,91	3,016	3,183	3,351	3,518	3,686	3,854	4,021	4,189	4,356
	PV300VD	0,521	0,52	0,52	0,529	0,552	0,587	0,63	0,681	0,733	0,794	0,86	0,926	0,996	1,065	1,137	1,215	1,298
	PV250	0,407	0,409	0,41	0,419	0,444	0,481	0,527	0,578	0,637	0,702	0,775	0,854	0,934	1,02	1,109	1,2	1,299
C _K	PV150	0,604	0,622	0,647	0,679	0,718	0,762	0,807	0,852	0,896	0,938	0,979	1,02	1,06	1,099	1,137	1,176	1,215
	PV09	0,608	0,635	0,659	0,692	0,738	0,812	0,902	1,001	1,079	1,19	1,324	1,492	1,677	1,886	2,115	2,394	2,7
	PV300VD	1,862	1,842	1,824	1,808	1,792	1,778	1,765	1,753	1,741	1,73	1,72	1,71	1,701	1,692	1,683	1,675	1,667
	PV250	1,86	1,84	1,822	1,806	1,79	1,776	1,763	1,751	1,739	1,728	1,718	1,708	1,699	1,69	1,681	1,673	1,666
	PV150	1,952	1,931	1,912	1,894	1,878	1,863	1,848	1,835	1,823	1,811	1,8	1,79	1,78	1,77	1,761	1,753	1,744
C _{г0}	PV09	1,955	1,933	1,913	1,895	1,879	1,864	1,849	1,838	1,828	1,815	1,806	1,795	1,784	1,774	1,764	1,754	1,746
	PV300VD	0,032	0,034	0,035	0,037	0,038	0,039	0,041	0,042	0,043	0,044	0,045	0,046	0,046	0,047	0,048	0,049	0,05
	PV250	0,032	0,033	0,035	0,037	0,038	0,039	0,041	0,042	0,043	0,044	0,045	0,045	0,046	0,047	0,048	0,049	0,049
	PV150	0,04	0,042	0,044	0,046	0,047	0,048	0,05	0,051	0,052	0,053	0,053	0,054	0,055	0,055	0,056	0,056	0,057
	PV09	0,04	0,041	0,042	0,043	0,044	0,044	0,045	0,046	0,046	0,047	0,048	0,049	0,05	0,051	0,052	0,053	0,053
C _г	PV300VD	2,519	2,500	2,483	2,478	2,486	2,508	2,540	2,580	2,621	2,672	2,729	2,786	2,847	2,908	2,972	3,043	3,119
	PV250	2,403	2,386	2,371	2,366	2,376	2,400	2,435	2,475	2,523	2,578	2,642	2,711	2,783	2,861	2,942	3,026	3,118
	PV150	2,700	2,699	2,707	2,723	2,747	2,777	2,809	2,842	2,875	2,906	2,936	2,968	2,999	3,028	3,058	3,089	3,120
	PV09	2,777	2,783	2,788	2,804	2,835	2,894	2,970	3,059	3,127	3,226	3,352	3,510	3,685	3,885	4,105	4,375	4,673
	PV300VD	29,81	34,73	40,01	45,83	52,33	59,59	67,63	76,54	86,17	96,86	108,54	121,14	134,78	149,39	165,12	182,32	200,98
R _г кН (буксирочное сопротивление)	PV250	28,75	33,51	38,63	44,24	50,57	57,65	65,57	74,24	83,9	94,51	106,28	119,2	133,22	148,6	165,3	183,4	203,14
	PV150	18,45	21,64	25,17	29,06	33,36	38,07	43,19	48,68	54,56	60,81	67,42	74,49	81,96	89,8	98,1	106,84	116,08
	PV09	17,82	20,92	25,11	29,85	34,42	39,94	45,10	50,08	58,21	65,22	73,24	84,1	95,75	110,32	126,94	146,81	169,56
	PV300VD	92,0	116,1	144,1	176,8	215,3	260,6	313,1	374,0	443,3	523,2	614,2	716,6	832,0	960,6	1104,2	1266,1	1447,4
	PV250	88,7	112,0	139,1	170,7	208,1	252,1	303,6	362,8	431,6	510,5	601,4	705,1	822,3	955,5	1105,4	1273,6	1462,9
вочная мощность)	PV150	56,9	72,4	90,6	112,1	137,3	166,5	200,0	237,9	280,7	328,4	381,5	440,7	505,9	577,4	656,0	741,9	836,0
	PV09	55,0	69,9	90,4	115,2	141,6	174,6	208,8	244,7	299,4	352,3	414,4	497,5	591,0	709,4	848,9	1019,5	1221,1

C_г = 0,104·10⁻³, C_{гг} = 0,174·10⁻³ (PV09) – коэффициент воздушного сопротивления

Подбор оптимальных характеристик винтов и расчёт ходовых качеств судов с классическим пропульсивным комплексом был выполнен с использованием результатов систематических модельных испытаний серии М 4-65, с ВРК – с использовани-

ем гидродинамических характеристик серийных винтов Ка 4-70 в направляющих насадках 19А (см. таблицу 5).

Зависимости между скоростью хода ПС нового поколения, нагрузкой ГД по мощности и числом

Рис. 2. Обводы моделей ПС нового поколения. Общий вид: а) PV300VD, б) PV250, в) PV150, г) PV09

Рис. 3. Обводы моделей ПС нового поколения. Кормовая и носовая оконечности: а) PV300VD, б) PV250, в) PV150, г) PV09

Рис. 4. Буксировочное сопротивление ПС нового поколения

оборотов гребных валов представлены в таблице 6 (графически – см. рисунок 6).

Для проекта PV09 расчёт ходовых качеств судна был выполнен с использованием дан-

ных производителя ВПК Rolls-Royce US 155P14 CRP [17] (2 x 1100 кВт, см. таблицу 7). Согласно результатам расчётов, скорость хода на тихой глубокой воде с ВПК US 155P14 CRP

а)

б)

в)

г)

Рис. 5. Визуализация расчётов для максимальных скоростей ПС нового поколения. Распределение давления воды: а) PV300VD, б) PV250, в) PV150, г) PV09

Таблица 5. Оптимальные элементы винтов и ходовые качества ПС проектов PV300VD, PV250, PV150

Характеристики		PV300VD				PV250 (ВРК)				PV150			
N_p (мощность на винте), кВт		13,00	13,50	14,00	14,24	12,00	12,50	13,00	12,93	13,00	13,50	14,00	14,63
η_e (КПД передачи мощности от ГД на винт)		165,33	182,45	200,82	210,10	133,22	148,60	165,30	162,73	98,10	106,84	116,08	128,34
D_p (диаметр гребного винта), м		7,7243	8,1742	8,6325	8,8554	10,556	10,411	10,266	10,287	5,8060	6,1441	6,4886	6,9315
x (количество винтов)		0,5808	0,6031	0,6255	0,6362	0,6149	0,6085	0,6020	0,6029	0,4678	0,4858	0,5038	0,5265
A_p/A_o (дисковое отношение)		1,0002	1,0138	1,0276	1,0343	1,2344	1,2316	1,2287	1,2291	0,9028	0,9128	0,9229	0,9360
z (число лопастей винта)		0,244	0,2403	0,2366	0,2349	0,3393	0,3416	0,3438	0,3435	0,2486	0,2454	0,2422	0,2383
V_s уз.		0,5757	0,5887	0,6013	0,6071	0,5336	0,5319	0,5300	0,5303	0,5108	0,5236	0,5360	0,5510
R_{r2} кН		73,38	72,26	71,16	70,64	747,4	871,3	1011,5	989,5	44,08	43,52	42,96	42,26
K_{br}		7,2345	7,6559	8,0851	8,2939	—	—	—	—	6,3110	6,6785	7,0530	7,5344
J		0,556	0,5774	0,5987	0,609	—	—	—	—	0,4946	0,5136	0,5326	0,5566
P/D_p		0,9854	0,9981	1,0111	1,0174	—	—	—	—	0,9177	0,9285	0,9395	0,9537
K_T		0,2482	0,2446	0,241	0,2393	—	—	—	—	0,2439	0,2405	0,2373	0,2332
η_0		0,5606	0,5736	0,5862	0,5921	—	—	—	—	0,5297	0,5426	0,5550	0,5700
T_F кН		72,08	71,02	69,99	69,5	—	—	—	—	45,72	45,09	44,48	43,71
Σ_{r2} кН (суммарная полезная тяга), для ВРК – мощность		218,83	215,54	212,31	210,78	1494,8	1742,6	2023	1979	133,88	132,13	130,39	128,23

Таблиця 6. Зависимость между скоростью, числом оборотов и мощностью ГД ПС проектов PV300VD, PV250, PV150

Параметр	Проект	V _{ср} , уз/лы																	14,2 / 14,6 ³⁾
		6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13 ¹⁾	13,5	14	
R _г , кН	PV300VD	29,81	34,73	40,01	45,83	52,33	59,59	67,63	76,54	86,17	96,86	108,54	121,14	134,78	149,39	165,12	182,32	200,98	
	PV250	28,75	33,51	38,63	44,24	50,57	57,65	65,57	74,24	83,9	94,51	106,28	119,2	133,22	148,6	162,73	—	—	
	PV150	18,45	21,64	25,17	29,06	33,36	38,07	43,19	48,68	54,56	60,81	67,42	74,49	81,96	89,8	98,1	106,84	116,08	
	PV300VD	121	131	141	151	161	172	182	193	205	216	228	240	252	264	276	289	302	
n, об/мин	PV250	108	117	126	135	144	153	163	172	182	193	203	214	225	236	246	—	—	
	PV150	220	238	257	276	295	315	334	354	374	394	414	435	455	476	496	517	538	
	PV300VD	1,857	1,864	1,87	1,872	1,869	1,861	1,849	1,835	1,82	1,802	1,784	1,765	1,746	1,727	1,709	1,688	1,659	
	PV250	1,71	1,716	1,721	1,723	1,719	1,71	1,698	1,684	1,668	1,65	1,63	1,609	1,588	1,567	1,549	—	—	
	PV150	1,564	1,565	1,562	1,558	1,551	1,543	1,534	1,525	1,516	1,508	1,5	1,492	1,485	1,477	1,47	1,463	1,456	
	PV300VD	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,129	0,129	0,129	0,128	0,128	0,127	0,127	0,126	0,126	0,125	0,125	
	PV250	0,291	0,292	0,292	0,292	0,292	0,291	0,29	0,288	0,287	0,285	0,283	0,28	0,278	0,276	0,274	—	—	
	PV150	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,181	0,181	0,181	0,18	0,18	0,18	0,179	0,179	0,179	0,179	0,178	
	PV300VD	48,5	61,1	75,8	92,9	113,3	137,3	165,3	198	235,3	278,7	328,4	384,7	448,5	520	600,2	691,5	794,5	
	PV250	84,1	106,2	131,9	161,9	197,3	238,9	287,5	343,4	408,2	482,5	568,1	665,8	776,1	901,6	1021,7	—	—	
Бортовые винты	PV150	34	43,2	54,2	67,1	82,3	100	120,4	143,6	169,8	199,1	231,7	268,2	308,6	353	401,8	455,4	514,2	
	PV300VD	4,9	6,1	7,6	9,3	11,3	13,7	16,5	19,8	23,5	27,9	32,8	38,5	44,9	52	60	69,2	79,5	
	PV250	7	8,9	11	13,5	16,4	19,9	24	28,6	34	40,2	47,3	55,5	64,7	75,1	85,1	—	—	
	PV150	4,9	6,2	7,7	9,6	11,8	14,3	17,2	20,5	24,3	28,4	33,1	38,3	44,1	50,4	57,4	65,1	73,5	
	PV300VD	1,868	1,874	1,881	1,883	1,88	1,871	1,86	1,846	1,831	1,814	1,796	1,777	1,758	1,74	1,721	1,701	1,681	
	PV250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	PV150	1,54	1,541	1,538	1,534	1,527	1,519	1,51	1,501	1,492	1,484	1,476	1,468	1,46	1,453	1,446	1,439	1,431	
	PV300VD	0,16	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,16	0,16	0,159	0,159	0,158	0,157	0,157	0,156	0,156	0,155	0,154	
	PV250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	PV150	0,134	0,134	0,134	0,134	0,134	0,134	0,133	0,133	0,133	0,133	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,131	0,131	
Центральный винт	PV300VD	48,7	61,4	76,1	93,4	113,8	137,9	166	198,8	236,2	279,6	329,4	385,7	449,4	520,8	600,9	691,9	794,6	
	PV250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	PV150	33,9	43,1	54	66,9	82	99,7	120,1	143,2	169,4	198,7	231,3	267,8	308,2	352,6	401,5	455,1	514	
	PV300VD	4,9	6,1	7,6	9,3	11,4	13,8	16,6	19,9	23,6	28	32,9	38,6	44,9	52,1	60,1	69,2	79,5	
N _г , кВт	PV250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	PV150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	PV300VD	4,9	6,1	7,6	9,3	11,4	13,8	16,6	19,9	23,6	28	32,9	38,6	44,9	52,1	60,1	69,2	79,5	
	PV250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
N _г % ²⁾	PV150	4,8	6,2	7,7	9,6	11,7	14,2	17,2	20,5	24,2	28,4	33	38,3	44	50,4	57,4	65	73,4	
	PV300VD	145,7	183,6	227,7	279,2	340,4	412,5	496,6	594,8	706,8	837	986,2	1155,1	1346,4	1560,8	1801,3	2074,9	2383,6	
	PV250	168,2	212,4	263,8	323,8	394,6	477,8	575	686,8	816,4	965	1136,2	1331,6	1552,2	1803,2	2043,4	—	—	
	PV150	101,9	129,5	162,4	201,1	246,6	299,7	360,9	430,4	509	596,9	694,7	804,2	925,4	1058,6	1205,1	1365,9	1542,4	
ΣN _г , кВт																			

1) — для PV250 максимальная расчётная скорость 12,9 уз/лов; 2) — мощность отнесена к номинальной мощности ГД 1000 кВт для проекта PV300VD, 1200 кВт для PV250, 1000 кВт для PV150; 3) — 14 уз/лов для PV300VD, 14,6 уз/лов для PV150

1) – для PV250 максимальная расчётная скорость 12,9 узлов; 2) – мощность отнесена к номинальной мощности ГД 1000 кВт для проекта PV300VD, 1200 кВт для PV250, 700 кВт для PV150; 3) – 14,2 узла для PV300VD, 14,6 узла для PV150

составляет 13,7 узла при 100% мощности главных двигателей (2 x 1100 кВт).

Расчётная скорость хода на тихой и глубокой воде ПС проекта PV300VD – 14,24 узла при 85% (3 x 825 кВт) нагрузке главных двигателей, ПС проекта PV250 – 12,93 узла при 85% (2 x 989 кВт), ПС проекта PV150 – 14,63 узла при 85% (3 x 577 кВт).

Натурные испытания ПС нового поколения. ПС проекта PV300VD «Пётр Великий» спущен на воду в мае 2019 года, находится на достройке (см. рисунок 7), ходовые испытания ещё не были проведены. ПС проекта PV300 «Мустай Карим», обводы которого близки к обводам ПС проекта PV300VD (разница в кормовой оконечности и пропульсивном комплексе – установлены 2 ВРК мощностью 1200 кВт каждая вместо таких же трёх) спущен на воду в сентябре 2019 года (см. рисунок 8), сдача планируется весной/летом 2020 года, предварительные ходовые испытания подтвердили (с запасом) контрактную скорость судна.

ПС проект PV09 «Штандарт» был сдан в эксплуатацию в 2017 году. В процессе строительства было принято решение о замене ВРК на SCHOTTEL STP 550 (2 x 1000 кВт), соответственно уменьшилась и расчётная скорость.

Ходовые испытания подтвердили мореходные качества ПС «Штандарт» проекта PV09. Судно на мерной миле развило максимальную скорость 23,8 км/ч. В 2019 году были проведены расширенные мореходные испытания «Штандарта» [18; 19] с целью подтверждения выполнения условий смешанного класса М-ПР 2,5 PPP (см. рисунок 9).

Испытания проводились при значении оборотов ГДГ 1500 об/мин, при пяти значениях курсового угла волнения (КУВ): 0°, 45°, 90°, 135° и 180° (0° соответствует движению против волны). При маневрировании судно поворачивалось к волне как правым, так и левым бортом. При проведении испытаний на каждом этапе судно двигалось прямым курсом

Таблица 7. Расчёт ходовых качеств ПС проекта PV09 с ВРК Rolls-Royce US 155P14 CRP

V_s , узлы	t	J	K_{DT}	η_0	K_T	T_E , кН	n , об/мин	N_E , кВт	N_E , %	Σ_{NE} , кВт
9,7	0,210	0,6992	7,338	0,5790	0,3818	34,46	678	260	23,6	520
10,3	0,210	0,6927	7,401	0,5761	0,3867	39,61	723	317	28,8	634
10,8	0,210	0,6850	7,476	0,5725	0,3925	45,56	769	386	35,1	772
11,3	0,210	0,6756	7,570	0,5677	0,3997	52,59	819	471	42,8	942
11,9	0,210	0,6655	7,669	0,5625	0,4073	60,60	871	574	52,2	1148
12,4	0,210	0,6547	7,777	0,5566	0,4154	69,82	926	699	63,5	1398
13,0	0,210	0,6433	7,889	0,5502	0,4239	80,34	983	849	77,2	1698
13,5	0,210	0,6303	8,018	0,5426	0,4337	92,91	1045	1037	94,3	2074
14,0	0,210	0,6169	8,150	0,5345	0,4437	107,31	1110	1265	115,0	2530

$$N_p = 1100 \text{ кВт}; D_p = 1,600 \text{ м}; x = 2; z = 5; \eta_s = 0,94$$

Источник: [17]

Рис. 6. Расчёт ходовых качеств ПС нового поколения

с постоянными оборотами ГД; время удержания судна на каждом курсе составляло 9–12 мин.

На основании проведённых испытаний и наблюдений установлено, что судно показало годные мореходные качества, а именно: уверенную управ-

ляемость на переднем ходу, умеренную качку, умеренную забрызгиваемость, заливаемость кринолина (в корме) на КУВ 90–180° (что вполне ожидалось, учитывая выбранный архитектурно-конструктивный тип судна), потерю скорости переднего хода на

Рис. 7. Носовая и кормовая оконечности ПС проекта PV300VD «Пётр Великий»

Рис. 8. Носовая и кормовая оконечности ПС проекта PV300 «Мустай Карим»

Рис. 9. Мореходные испытания ПС проекта PV09 (фактическая забрызгиваемость окон в носовой части судна на расчётной волне)

КУВ 0° от 21,0 до 18,8 км/ч (фактическое волнение $h_{3\%} = 2,32$ м), нормальную обитаемость.

Нарушений в работе СЭУ, оголения днища, всхожести на волну и зарывания в волну не наблюдалось. Судно прорезало волну без видимых усилий или эффектов. Замечаний к кораблестроительным элементам судна не было.

Проведённые в 2019 году натурные мореходные испытания в условиях расчётного ветро-волнового режима подтвердили, что мореходные качества ПС проекта PV09 «Штандарт» соответствуют спецификационным требованиям. Мореходные качества судна соответствуют классу PPP М-ПР 2,5, который присвоен судну.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Выполнено исследование ходовых качеств ПС нового поколения. Эти суда отличаются от классических проектов ПС, построенных в советское время, соотношением L/B – в большинстве своём («Днепр макс»/«Волго-Дон макс» и «ПостДнепр макс»/«Волго-Балт макс» классы) более длинные, обводами носовой и кормовой оконечностей – оптимизированы с помощью методов ВГД, а также спроектированы с учётом установки подруливающих устройств и ВРК соответственно.

Удовлетворительная сходимость результатов модельных и натурных мореходных испытаний на примере ПС проекта PV09 показывает эффективность применяемых инструментов.

REFERENCES

- [1] Egorov, G. V., Egorov, A. G., Ilnytskyi, I. A. (2019). Design features of river-sea cruise passenger vessels for Russian inland waterways and adjacent seas. Papers of the Intern. Conf. "Design & Operation of Passenger Ships". London (UK): Royal Institution of Naval Architects, pp. 21–29.
- [2] Egorov, A. G., Egorov, G. V. (2020). River and river-sea cruise passenger ships. Operational experience, prognosis and novel concepts. Proceedings of the Intern. Conf. "Sustainable and Safe Passenger Ships". Athens (Greece): Royal Institution of Naval Architects & Hellenic Institute of Marine Technology, pp. 133–143.
- [3] Egorov, G. V., Ilnytskyi, I. A., Kalugin, Ya. V. (2013). "Lineyka" kruiznykh passazhirskikh sudov dlya vnutrennikh vodnykh putey ["Lineup" of cruise passenger ships for inland waterways]. Odessa: Vestnik ONMU, No. 2 (38), pp. 20–40 [in Russian].
- [4] Lyubimov, V. I. (2018). Osobennosti arkhitekturno-konstruktivnogo tipa sovremennykh rechnykh kruiznykh sudov [Features of architectural-construction type of modern river cruise ships]. Nizhniy Novgorod: Vestnik VGAVT, No. 55, pp. 49–55 [in Russian].
- [5] Semin, A. A. (2013). Klassifikatsiya sposobov otsenki komfortabel'nosti kak sostavlyayushchiy element proyektirovaniya sudov i organizatsii obsluzhivaniya passazhirov [Classification of assessment methods of comfort levels as basic element of design ships and organization of passenger service]. Odessa: Vestnik ONMU, No. 1 (37), pp. 180–187 [in Russian].
- [6] Zverkhovskiy, O., De Jong, J. S. (2020). DAMEN air cavity system of sustainable passenger ships. Proceedings of the Intern. Conf. "Sustainable and Safe Passenger Ships". Athens (Greece): Royal Institution of Naval Architects & Hellenic Institute of Marine Technology, pp. 65–70.
- [7] Kolesnik, D. V. (2010). Sravneniye obshchey effektivnosti ispol'zovaniya VRK i traditsionnogo propul'sivnogo kompleksa na sudakh smeshannogo reka-more plavaniya [Comparison of overall efficiency of FPRP usage and traditional propulsion system on river-sea vessels] / Collection book of Int. sc.-pract. conf. in honor of 80 years anniversary of Prof. V. V. Kozlyakov. Odessa: Sudostroenie i sudoremont, pp. 131–136 [in Russian].
- [8] VETH rudder propellers (2019). VETH propulsion by TwinDisc. Papendrecht, The Netherlands, 48 p.
- [9] SCHOTTEL propulsion for next-generation Yangtze cruise vessel. (2020). "Schottel" website. Retrieved from: https://www.schottel.de/news-events/news/news-detail/?no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=645 (Last accessed: 01.04.2020).
- [10] Sasaki, N., Kuribayashi, S., Fukazawa, M., Atlar, M. (2020). Towards a realistic estimation of the powering performance of a ship with a Gate Rudder System. Journal of Marine Science and Engineering, Volume 8, 1, paper 43.
- [11] Bychkov, V. Ya., Grosheva, L. S., Plushaev, V. I. (2018). Matematicheskaya model' sudna s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom "Zolotoye kol'tso" [Mathematical model of ship with steering-wheeled complex "Zolotoe Kolt'so"]. Astrakhan: Vestnik AGTU, No. 3, pp. 36–49 [in Russian].
- [12] Egorov, G. V., Ilnytskyi, I. A., Stankov, B. N., Pechenyuk, A. A. (2011). Prorabotka variantov propul'sivnogo kompleksa sudna smeshannogo plavaniya klassa "Volgo-Don maks" [Workout of variants of propulsive complexes of river-sea vessel of Volgo-Don Max class]. Morskoy Vestnik, No. 2 (38), pp. 101–106 [in Russian].
- [13] (2011). Issledovaniye khodovykh kachestv passazhirskogo sudna na 300 passazhirov [Study of running characteristics of passenger ship for 300 passengers]. Technical report DMT-11-084. 39 p. [in Russian].
- [14] (2011). Issledovaniye khodovykh kachestv passazhirskogo sudna na 150 passazhirov [Study of running characteristics of passenger ship for 150 passengers]. Technical report DMT-11-086. 38 p. [in Russian].
- [15] (2011). Issledovaniye khodovykh kachestv passazhirskogo barzhe-buksirnogo sostava na 250 passazhirov [Study of running characteristics of passenger tug-barge combination for 250 passengers]. Technical report DMT-11-088. 39 p. [in Russian].
- [16] (2012). Issledovaniye khodovykh kachestv passazhirskogo sudna [Study of running characteristics of passenger ship]. Technical report DMT-12-095. 35 p. [in Russian].
- [17] (2014). Trial performance prediction with open FP propellers: trial prediction of project PV09 // Rolls-Royce, 2 p.
- [18] (2019). Programma naturnykh morekhodnykh ispytaniy v usloviyakh raschetnogo vetro-volnovogo rezhima [Program of full-scale seaworthy trials at calculated wind-wave regime]. Volume MIB.5372, 18 p. [in Russian].

- [19] (2019). Protokol naturnykh morekhodnykh ispytaniy v usloviyakh raschetnogo vetro-volnovogo rezhima [Log sheet of full-scale seaworthy trials at calculated wind-wave regime]. Volume MIB.5420, 38 p. [in Russian].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Egorov, G. V., Egorov, A. G., Ilnytskyi, I. A. (2019). Design features of river-sea cruise passenger vessels for Russian inland waterways and adjacent seas. Papers of the Intern. Conf. "Design & Operation of Passenger Ships". London (UK) : Royal Institution of Naval Architects. Pp. 21–29.
- [2] Egorov, A. G., Egorov, G. V. (2020). River and river-sea cruise passenger ships. Operational experience, prognosis and novel concepts. Proceedings of the Intern. Conf. "Sustainable and Safe Passenger Ships". Athens (Greece) : Royal Institution of Naval Architects & Hellenic Institute of Marine Technology. Pp. 133–143.
- [3] Егоров, Г. В., Ильницкий, И. А., Калугин, Я. В. (2013). «Линейка» круизных пассажирских судов для внутренних водных путей. *Вісник ОНМУ*. Одеса : ОНМУ. Вип. 2 (38). С. 20–40.
- [4] Любимов, В. И. (2018). Особенности архитектурно-конструктивного типа современных речных круизных судов. *Вестник ВГАВТ*. Раздел I: Судостроение, судоремонт и экологическая безопасность судна. Вып. 55. Нижний Новгород : ВГАВТ. С. 49–55.
- [5] Семин, А. А. (2013). Классификация способов оценки комфортабельности как составляющий элемент проектирования судов и организации обслуживания пассажиров. *Вестник ОНМУ*. Одесса : ОНМУ. Вып. 1 (37). С. 180–187.
- [6] Zverkhovskiy, O., De Jong, J. S. (2020). DAMEN air cavity system of sustainable passenger ships. Proceedings of the Intern. Conf. "Sustainable and Safe Passenger Ships". Athens (Greece) : Royal Institution of Naval Architects & Hellenic Institute of Marine Technology. Pp. 65–70.
- [7] Колесник, Д. В. (2010). Сравнение общей эффективности использования ВРК и традиционного пропульсивного комплекса на судах смешанного река-море плавания. *Сборник докладов междунар. научно-практ. конф. в честь 80-летнего юбилея профессора В.В. Козлякова*. Одесса : Судостроение и судоремонт. 2010. С. 131–136.
- [8] VETH rudder propellers. (2019). VETH propulsion by TwinDisc. Papendrecht, The Netherlands. 48 p.
- [9] SCHOTTEL propulsion for next-generation Yangtze cruise vessel. (2020). Сайт компании «Schottel». URL: https://www.schottel.de/news-events/news/news-detail/?no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=645 (дата обращения: 01.04.2020).
- [10] Sasaki, N., Kuribayashi, S., Fukazawa, M., Atlar, M. Towards a realistic estimation of the powering performance of a ship with a Gate Rudder System. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020. Volume 8, 1, paper 43.
- [11] Бычков, В. Я., Грошева, Л. С., Плющаев, В. И. (2018). Математическая модель судна с колёсным движительно-рулевым комплексом «Золотое кольцо». *Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология*. № 3. Астрахань : АГТУ. С. 36–49.
- [12] Егоров, Г. В., Ильницкий, И. А., Станков, Б. Н., Печенюк, А. А. (2011). Проработка вариантов пропульсивного комплекса судна смешанного плавания класса «Волго-Дон макс». *Морской вестник*. № 2 (38). С. 101–106.
- [13] (2011). Исследование ходовых качеств пассажирского судна на 300 пассажиров: технический отчёт DMT-11-084. 39 с.
- [14] (2011). Исследование ходовых качеств пассажирского судна на 150 пассажиров: технический отчёт DMT-11-086. 38 с.
- [15] (2011). Исследование ходовых качеств пассажирского барже-буксирного состава на 250 пассажиров: технический отчёт DMT-11-088. 39 с.
- [16] (2012). Исследование ходовых качеств пассажирского судна: технический отчёт DMT-12-095. 35 с.
- [17] (2014). Trial performance prediction with open FP propellers: trial prediction of project PV09. Rolls-Royce. 2 p.
- [18] (2019). Программа натурных мореходных испытаний в условиях расчётного ветро-волнового режима: Выпуск МИБ.5372. 18 с.
- [19] (2019). Протокол натурных мореходных испытаний в условиях расчётного ветро-волнового режима: Выпуск МИБ.5420. 38 с.

© А. Г. Егоров

Дата надходження статті до редакції: 08.04.2020

Дата затвердження статті до друку: 17.04.2020