Федеральное агентство морского и речного транспорта
Федеральное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Волжская государственная академия водного транспорта

ВЕСТНИК
Волжской государственной академии
водного транспорта

Выпуск 31

Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ»
Н. Новгород, 2012

УДК 629
В 38

В 38 Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 31. – Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012.–208с.

Редакционная коллегия:
д-р. техн. наук, проф. Е.П.РОННОВ;
канд. техн. наук, доц. С.Н. ГИРИН.

Настоящий выпуск Вестника ВГАВТ публикует статьи, содержащие исследования по проектированию транспортных и обстановочных судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания, в том числе скоростных с динамическим принципом поддержания. Рассматриваются вопросы обоснования их элементов и аэро- и гидродинамических характеристик, расчета нагрузки масс, проектирования судовых систем. Представлены статьи определения общей прочности судов, цистерн для жидких грузов и усиления корпусов железобетоном. Приведены задачи моделирования организационно-технологической подготовки судостроительно-судоремонтного производства, проектирования технологической оснастки.

ISBN 978-5-901722-19-0

© ВГАВТ, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Анисимова В.В.
Анализ элементов и характеристик обстановочных судов внутреннего плавания 9

Архипова Ю.А., Бурмистров Е.Г., Ганичев А.В.
Обоснование современных методов монолитного железобетонного судостроения на основе новых конструкционных решений..... 16

Бурмистров Е.Г., Студнев С.В., Михеева Т.А.
Перспективная установка для разделительной резки на лом крупногабаритных отходов судоходства 22

Галочкин Д.А., Бурмистров Е.Г.
Разработка генерального и технологических графиков постройки судна с учётом законов производственной логистики 26

Горин Н.Л., Васькин С.В., Этин В.Л.
Проектирование системы аэрации, обеспечивающей увеличение сроков хранения сточных вод в судовых сборных цистернах 34

Давыдова С.В.
Анализ современных тенденций и обобщение опыта автоматизированного формирования общего вида 41

Денисова Е.И.
Состояние и перспективы развития речных круизных судов 44

Захарова В.В., Бурмистров Е.Г.
Анализ современных и перспективных типов балластных систем судов внутреннего и смешанного (река–море) плавания 48

Зяблов О.К., Фунтикова Е.В.
Графическое моделирование объектов ремонта в составе электронных актов дефектации по корпусу и ДРК судна 57

Кочнев Ю.А., Роннов Е.П.
Обоснование коэффициента общей полноты танкера смешанного плавания 59

Любимов В.И., Варакосов Ю.Г., Барышев В.И.
Современные концепции и перспективные сферы использования транспортных экранопланов..... 64

Огнев Н.В., Бурмистров Е.Г.
Особенности проектирования технологической оснастки для транспортировки крупногабаритных секций 68

Огнев Н.В., Галочкин Д.А., Бурмистров Е.Г.
Некоторые особенности оптимизации схем материальных потоков на отечественных судостроительных верфях..... 73

Паутова О.А., Бурмистров Е.Г.
Моделирование производственной системы верфи с оптимизацией организационно-технологической схемы размещения производства..... 78

Роннов Е.П.
Вместимость сухогрузного судна внутреннего плавания 86

Роннов Е.П., Анисимова В.В.
Расчет нагрузки масс обстановочных судов внутреннего плавания 92

Роннов Е.П., Волков Д.В.
Оценка остойчивости судов внутреннего плавания на ранних стадиях проектирования 103

Роннов Е.П., Шмаков В.М.
Сопоставление отечественных и европейских требований к остойчивости и непотопляемости судов внутреннего плавания 105

Студнев С.В., Михеева Т.А., Бурмистров Е.Г.
Анализ конструктивно-технологических особенностей утилизируемых судов внутреннего и смешанного плавания 111

Блохин В.Н., Прохоров В.М., Кальясов П.С., Якимов А.К., Крыжанов А.М., Туманин А.В., Шабаров В.В.
Опыт применения суперкомпьютерных технологий для определения аэродинамических характеристик экраноплана на крейсерском режиме движения 119

Борисов А.М.
Обоснование конструкции усиления железобетоном корпуса металлического дока проекта Д600 126

Гирин С.Н., Гордлеев С.Д.
Анализ напряженного состояния автомобильной цистерны для перевозки жидких грузов при квазистатических нагружениях 131

Гирин С.Н., Гордлеев С.Д.
Натурные испытания автомобильной цистерны для перевозки жидких грузов 136

Гирин С.Н., Гордлеев С.Д.
Проблемы эксплуатационной прочности автомобильных цистерн для перевозки жидких грузов 141

Гирин С.Н., Протопопов В.Б., Созинов С.В.
Опыт работы кафедры СМ, КК и СМК ФБОУ ВПО «ВГАВТ» по разработке проектов модернизации судов 145

Гирин С.Н., Фролов А.М.
О влиянии достоверности прогноза волнения на величину волновых изгибающих моментов судов смешанного плавания с классом Российского Речного Регистра 150

Горохова М.В., Пылаева А.А.
Численное моделирование в системе ANSYS напряженно-деформированного состояния прямоугольной мембраны, находящейся под действием равномерно распределенной нагрузки 162

Константинов П.В., Шабаров В.В.
Оценка возможностей применения технологий вычислительного эксперимента для определения гидродинамических характеристик подводных крыльев при проектировании судов на подводных крыльях (СПК) 171

Кудин М.В., Ермолаев А.В.
Анализ вибронагруженности и снижение знакопеременных нагрузок в трансмиссиях СВП 178

Кузнецова Т.А.
Приближенное определение энергоемкости конструктивной защиты танкеров внутреннего и смешанного плавания при столкновении 181

Трянин И.И.
Решение уравнения, определяющего величину расчетного волнового момента по его обеспеченности 189

Францев М.Э.
Проектный анализ эксплуатационных и экономических аспектов использования амфибийных катеров на воздушной подушке для круглогодичных и сезонных пассажирских перевозок 191

Фролов А.М., Иванов А.В
Проектирование эквивалентного бруса судов с двойным дном 199

Federal Agency of Sea and River Transport
Volga State Academy of Water Transport

BULLETIN
of the Volga State Academy
of Water Transport

Issue 31

VSAWT publishing house
N. Novgorod, 2012

Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport (VSAWT). Iss.31. – N. Novgorod: VSAWT publishing house, 2012. – 208 p.

Editorial board:
D. Sc. (Tech.), Professor E. P. RONNOV;
Ph.D. (Tech.), Associate Professor S. N. GIRIN;

The present issue of the Bulletin VSAWT includes articles containing researches on design of transport and technical inland and combined (river-sea) vessels, including high-speed dynamically supported types. It is consider questions of ship's elements justification, and its aero-and hydrodynamic characteristics, calculation of load masses, and the design of ship systems. Articles include determination methods for strength of ships, tanks for liquid cargo and strengthen reinforced concrete building, and tasks of modeling the organizational and technological preparation of shipbuilding and ship repair production tooling design.

ISBN 978-5-901722-19-0

© VSAWT, 2012

CONTENTS

Anisimova V.V.
Analysis of components and characteristics of inland waterway buoy-laying vessels 11

Arkhipova U.A., Burmistrov E.G., Ganichev A.V.
Study of modern methods of constructing ships using ferroconcrete on the basis of new construction solutions 28

Burmistrov E.G., Studnev S.V., Mikheeva T.A.
Prospective installation for separation cutting for scrap of large sized vessel waste items 24

Galochkin D.A., Burmistrov E.G.
Developing general work schedule as well as production process schedules for vessel construction allowing for production logistics laws 28

Gorin N.L., Vas'kin S.V., Etin V.L.
Engineering design of system of the aeration providing increase in periods of storage of sewage in ship modular tanks..... 36

Davydova S.V.
Analysis of modern tendencies and summing-up of experience in the area of automated formation of a general kind 43

Denisova E.I.
Status and prospects of development of river cruise vessels 46

Zakharova V.V., Burmistrov E.G.
Analysis of present-day and prospective ballast systems of river and river-sea vessels..... 50

Zyablov O.K., Funtikova E.V.
Graphics modeling of repair items included in hull and propulsion and steering assembly fault finding sheets presented in electronic form 59

Kochnev U.A., Ronnov E.P.
Study of block coefficient for river-sea tanker 61

Lubimov V.I., Varakosov U.G., Baryshev V.I.
Modern concepts and prospective areas of using transport airfoil boats 66

Ognev N.V., Burmistrov E.G.
particulars of designing tooling equipment for transporting large sized sections 70

Ognev N.V., Galochkin D.A., Burmistrov E.G.
Some particulars of optimizing material flows at domestic shipyards..... 75

Pautova O.A., Burmistrov E.G.
Shipyard production system modeling with optimization of organization and technology scheme of production location 80

Ronnov E.P.
Cargo capacity of inland waterway bulk cargo vessel 88

Ronnov E.P., Anisimova V.V.
Mass load calculation of inland waterway buoy-laying vessels 94

Ronnov E.P., Volkov D.V.
Estimation of inland waterway vessel stability at early stages of design..... 105

Ronnov E.P., Shmakov V.M.
Comparison of national and european requirements of stability and unsinkability of inland waterway vessels 107

Studnev S.V., Mikheeva T.A., Burmistrov E.G.
Analysis of structural and technological particulars of river and river-sea vessels to be utilized 113

Blokhin V.N., Prokhorov V.M., Kalyasov P.S., Yakimov A.K., Kryzhanov A.M., Tumanin A.V., Shabarov V.V.
The application of computer simulation for the estimation of aerodynamic characteristics of WIG on crusing regime 123

A.M. Borisov
Justification of the structure of reinforced concrete strengthening the Д600 metal dock body 130

Girin S.N., Gordleyev S.D.
Stressed state analysis of the motor-car tank for liquid cargo transportation under quasi-static loading 135

Girin S.N., Gordleyev S.D.
Full-scale testing of the motor-car tank for liquid cargo transportation..... 140

Girin S.N., Gordleyev S.D.
Service durability problems of truck tanks for liquid cargo transportation..... 145

Girin S.N., Protopopov V.B., Sozinov S.V.
Work experience of the department of structural resistance, hull design and ship structural mechanics of FSEI HPE VSAWT in the ship modernization design development..... 149

Girin S.N., Frolov A.M.
Influence of sea state forecast validity on the size of wave-induced bending moments of mixed river-sea-going ships classed by Russian River Register..... 154

Gorokhova M.V., Pylaeva A.A.
Numerical modeling of the system ANSYS voltage-strain state rectangular membrane under the action uniformly distributed load 166

Konstantinov P.V., Shabarov V.V.
Assessment of possibilities of computer application experiment technology for definition of hydro mechanical characteristics of underwater wings in hydrofoil crafts design..... 175

Kudin M.V., Ermolaev A.V.
Analysis of vibro-loading and reduction of alternating-sign load in transmission of hovercraft..... 182

Kuznetsova T.A.
Approximate calculation of the structure protection's energy capacity for river and river-sea type tankers in case of the collision 185

Tryanin I.
Solution of equation determining the magnitude of design wave moment based on its probability of occurrence 193

Frantsev M.E.
The design analysis of operational and economic aspects of use of amfibiyny boats on an airbag for all-the-year-round and seasonal passenger traffic..... 195

Frolov A.M., Ivanov A.V.
Design of box-girder on double bottom ships..... 203

УДК 629.12.001.2

В.В. Анисимова, *аспирант, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ОБСТАНОВОЧНЫХ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ

В статье проанализированы элементы и характеристики обстановочных судов внутреннего плавания. Получены статистические зависимости для их нахождения на начальном этапе проектирования.

В настоящее время наиболее остро стоит вопрос обеспечения безопасности судоходства, что оговаривается в Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. С этой целью необходимо кардинальное обновление флота, обслуживающего внутренние водные пути. По состоянию на 1 февраля 2010 г. численность обстановочных судов внутреннего плавания составляла 704 единицы [1]. Около 60% этих судов эксплуатируется более 30 лет, тогда как нормативный срок эксплуатации составляет 21 год [2].Суда устарели не только физически, но и морально. В Федеральной целевой программе «Развитие транспортной системы РФ (2010–2015 гг.), в подпрограмме «Внутренний водный транспорт» было предусмотрено строительство судов обслуживающего флота в количестве 352 ед., в том числе строительство 250 единиц обстановочных теплоходов, обеспечивающих обслуживание плавучей и береговой судоходной обстановки, проведение работ по обследованию внутренних водных путей, ремонт навигационной обстановки, выполнение промерных работ [2].

Создание новых судов обстановочной службы с оптимальными характеристиками, при которых будут преодолены различные существующие в настоящее время ограничения по их применению, позволит в дальнейшем существенно повысить эффективность их использования, снизить себестоимость выполнения работ по содержанию водных путей. Проектирование нового обстановочного теплохода, особенно на начальных стадиях, невозможно без анализа статистических данных элементов и характеристик находящихся в эксплуатации судов, некоторые из которых представлены в таблице 1.

Анализируя статистические данные по обстановочным судам можно выявить аналитические зависимости, которые могут быть использованы на этапе концептуального проектирования.

При выборе длины судна необходимо учитывать не только условия ходкости, но и размещение груза (буев). Графики зависимостей длины судна от скорости хода, мощности главных двигателей и грузоподъемности приведены на рис. 1–3 соответственно. Значения длин обстановочных судов лежат в том же диапазоне, что и у разъездных, но у последних длина судна не находится в линейной зависимости от скорости хода, как это можно видеть у рассматриваемых судов.

Таблица 1

Элементы и характеристики обстановочных судов

Элементы и характеристики	Проекты												
	Р-121А	Р-121	81240	81240А	391А	391Б	$391Б_1$	457	Т-101А	Т-81	3050	3050.1	3052
Длина L,м	33,56	32,55	27,55	27,55	24,2	24,2	24,2	19,9	19,6	16,1	21,8	24,95	33,6
Ширина B,м	5,5	5,5	4,45	4,45	3,7	3,7	3,7	3,3	3,3	3	3,5	4	5,8
Высота борта H,м	2,6	2,6	1,6	1,6	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2	0,86	1,2	1,5	2,6
Осадка T,м	1,45	1,34	1	0,94	0,82	0,82	0,82	0,6	0,65	0,34	0,67	0,98	1,31
L/B	6,1	5,92	6,19	6,19	6,54	6,54	6,54	6,03	5,94	5,37	6,23	6,24	5,79
B/T	3,79	4,1	4,45	4,73	4,51	4,51	4,51	5,5	5,08	8,82	5,22	4,08	4,43
L/H	12,91	12,52	17,22	17,22	17,29	17,29	17,29	16,58	16,33	18,72	18,17	16,63	12,92
Водоизмещение D,т	149,7	127	74,07	67,64	42,4	42,36	42,76	31,4	20,35	12,83	39,2	72	134,4
Скорость V,км/ч	24	24	20	20	19,4	20	20	15	15	12	15,2	20	24
Мощность N, кВт	330	330	140	140	110	110	110	66	66	40	85	205,9	411,8
Коэффициент полноты δ	0,559	0,529	0,604	0,587	0,577	0,577	0,582	0,797	-	0,781	0,767	0,736	0,526
Масса перевозимых буев $P_{гр}$,т	1,5	1,8	-	-	0,7	0,7	0,7	0,8	-	-	-	-	-
Число членов экипажа n	10	10	6	4	6	6	6	3	6	2	3	6	10
Число Фруда по водоизмещению Fr_V	0,924	0,95	0,866	0,879	0,922	0,951	0,949	0,75	-	0,695	0,731	0,87	0,941
Число Фруда по длине Fr_L	0,368	0,373	0,338	0,338	0,35	0,361	0,361	0,298	0,301	0,265	0,283	0,355	0,367
Адмиралтейский коэффициент Ca	5786	5185	4507	4242	3555	3952	3977	1971	1476	820	1886	2776	4322

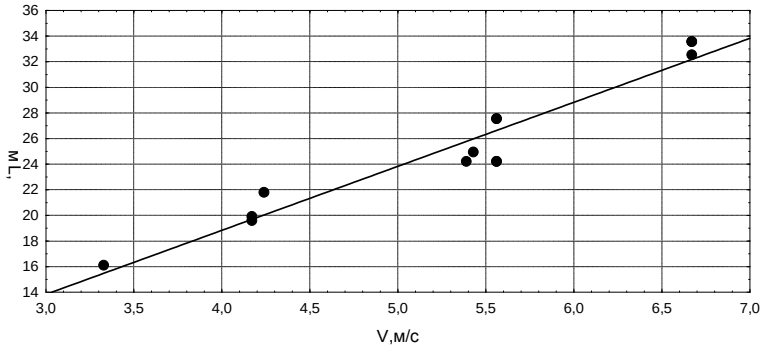


Рис.1. Зависимость длины судна от скорости хода

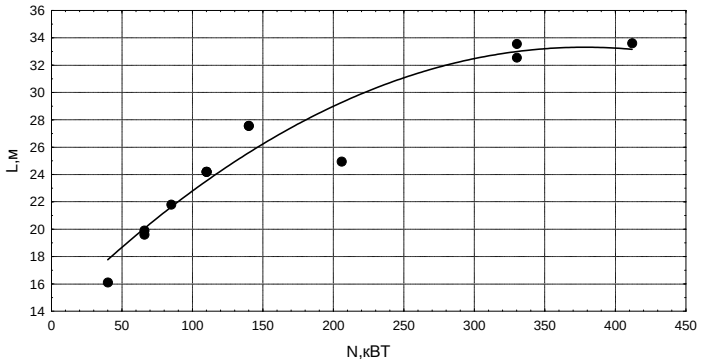


Рис.2. Зависимость длины судна от мощности главных двигателей

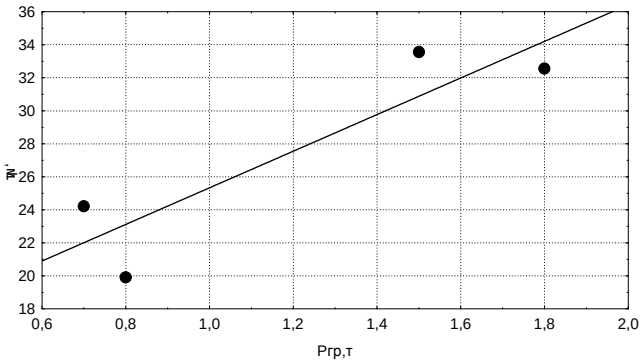


Рис. 3. Зависимость длины судна от массы перевозимых буев

Расчетная длина судна в зависимости от скорости хода, мощности и полезной массы груза (массы перевозимых буев) может быть представлена следующими выражениями:

$$
\begin{aligned}
&L = 4{,}998V - 1{,}156 \pm 1{,}163;\\
&L = -0{,}0001N^2 + 0{,}103N + 13{,}873 \pm 1{,}948;\\
&L = 11{,}091P_{\tilde{a}\partial} + 14{,}244 \pm 2{,}892.
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

График зависимости ширины судна от его длины $B = f(L)$ приведен на рис. 4.

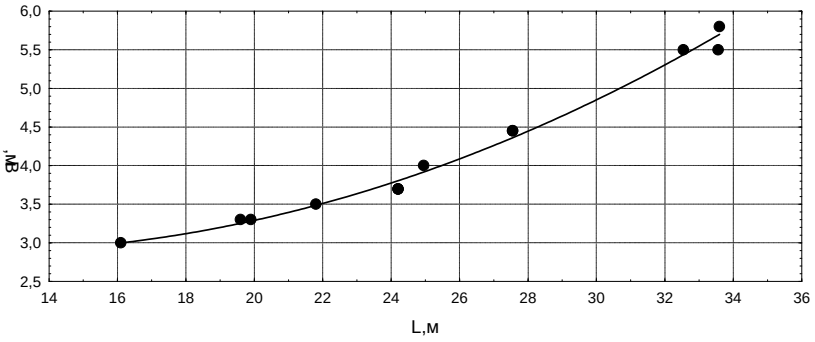


Рис. 4. Зависимость ширины от длины судна

Ширина судна аналитически может быть представлена:

$$B = 0{,}006L^2 - 0{,}137L + 3{,}680 \pm 0{,}087 \qquad (2)$$

Зависимость высоты борта от длины судна $H = f(L)$ приведены на рис. 5. Высоту борта менее 0,7 м, как следует из анализа, принимать не следует по конструктивным и общепроектным соображениям (не выполняются условия вместимости, ограничения по минимальному надводному борту).

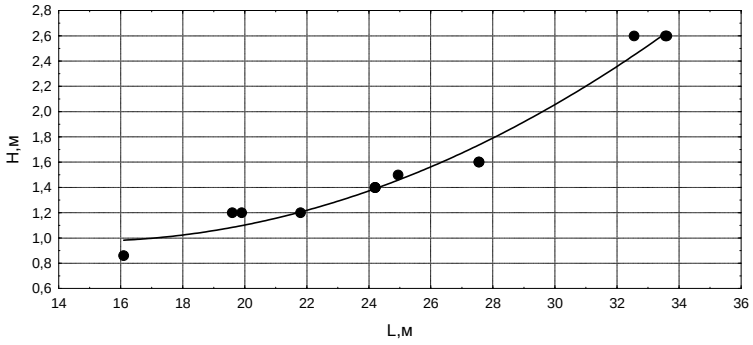


Рис. 5. Зависимость высоты борта от длины судна

Аналитическая зависимость высоты борта в зависимости от длины судна имеет вид:

$$H = 0{,}005L^2 - 0{,}137L + 1{,}980 \pm 0{,}234 \qquad (3)$$

Известно, что для судна целесообразно принимать большую осадку, так как это позволяет устанавливать винты большего диаметра, что оказывает положительное влияние на гидродинамический КПД движителя, уменьшается остаточное сопротивление, улучшается устойчивость на курсе. Однако при этом выступает ограничением глубина судового хода и при постоянном водоизмещении уменьшаются размеры судна в плане, что не всегда приемлемо по условию вместимости. Поэтому выбор осадки судна носит комплексный характер и должен учитывать отмеченные выше обстоятельства. Все это в полной мере относится и к обстановочным судам. Исходя из этого, на начальных этапах обоснования главных элементов этих судов можно воспользоваться зависимостью, приведенной на рис. 6, полагая, что использованные для его построения статистические значения обосновывались комплексно.

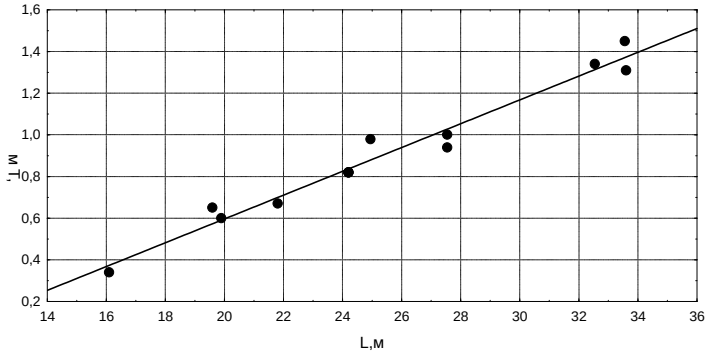


Рис. 6. Зависимость осадки судна от длины

Зависимость осадки от длины судна выражается в следующем виде:

$$T = 0{,}057L - 0{,}546 \pm 0{,}044 \qquad (4)$$

Параметры формы корпуса характеризуют соответствующие его геометрические характеристики. Такими параметрами прежде всего являются коэффициент общей полноты δ отношения $L/B, B/T$.

Коэффициент общей полноты корпуса судна δ влияет на многие качества судна: ходкость, остойчивость, непотопляемость, грузоподъемность и грузовместимость, но выбирается он, прежде всего, из соображений, связанных с ходкостью. Коэффициент полноты δ в зависимости от числа Фруда по длине, являющегося мерой относительной скорости судна, представлен на рис.7.

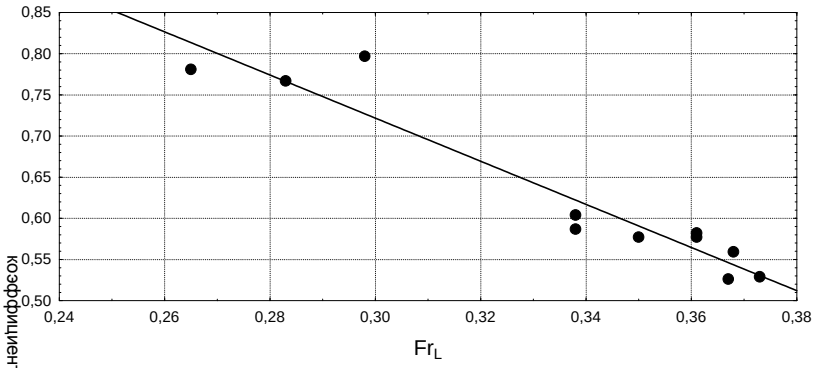


Рис. 7. Зависимость коэффициента полноты δ от числа Фруда по длине

Из графика видно, что δ убывает с увеличением скорости, что соответствует общей закономерности выбора этого коэффициента. Аналитическая зависимость коэффициента полноты от числа Фруда по водоизмещению выражается в следующем виде:

$$\delta = -2{,}620 Fr_L + 1{,}508 \pm 0{,}035. \qquad (5)$$

Зависимости соотношений главных размерений влияющих на ходкость судна (L/B), остойчивость (B/T) и общую прочность (L/H) от длины судна представлены рисунками 8, 9, 10 и выражениями (6), (7), (8) соответственно.

Как видно из рис. 8 отношение (L/B) у обстановочных судов колеблется от 5,37 до 6,54. Этот же диапазон и у разъездных судов, но при выявлении зависимости (L/B) от числа Фруда по длине какой-либо закономерности у них не наблюдается.

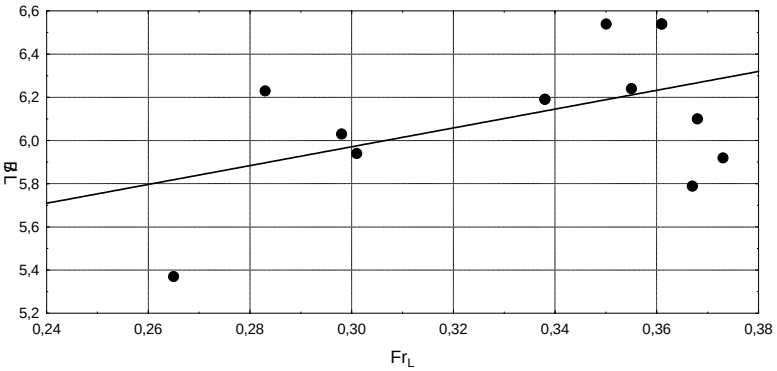


Рис. 8. Зависимость L/B от числа Фруда по длине судна

Важным качеством для обстановочных судов при проведении рабочих операций является остойчивость, на которую влияет отношение (B/T), уменьшающееся с увеличением длины судна, как видно из рис.9. Однако, (B/T) изменяется в сравнительно небольшом диапазоне от 3,8 до 5,5. Выпадающее значение ($B/T = 8{,}8$ проект №Т-81) можно предположительно объяснить необходимостью получения меньшей осадки судна, продиктованной ограничением по глубине судового хода.

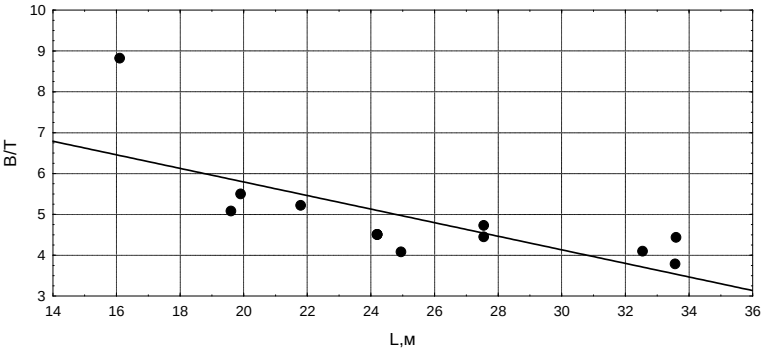


Рис. 9. Зависимость B/T от длины судна

С увеличением длины судна отношение L/H уменьшается (рис. 10), что в общем случае приводит к улучшению условий обеспечения общей продольной прочности и жесткости. Максимальная величина этого отношения регламентируется Правилами Российского Речного Регистра. Принятые значения этого отношения не превышают «регистровых» и во многих случаях меньше их, что, видимо, для этих судов связано не с проблемами прочности, а обуславливается выбором высоты борта из общепроектных соображений.

Аппроксимация графических зависимостей, приведенных на рис. 8–10, позволила получить следующие выражения:

$$L/B = 4{,}359Fr_L + 4{,}663 \pm 0{,}230; \quad (6)$$

$$B/T = -0{,}166L + 9{,}116 \pm 0{,}643; \quad (7)$$

$$L/H = -0{,}313L + 24{,}165 \pm 0{,}997. \quad (8)$$

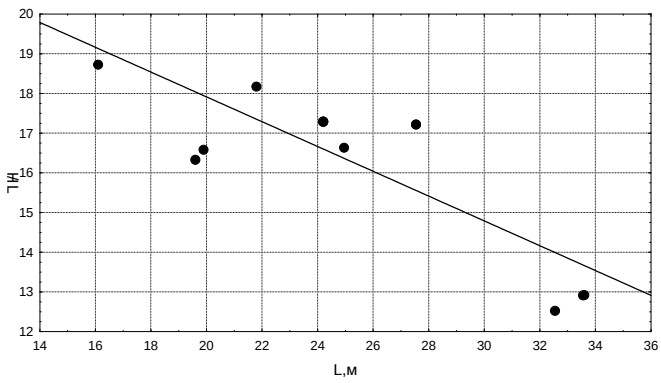


Рис. 10. Зависимость L/H от длины судна

Рассматривая зависимость адмиралтейского коэффициента от скорости судна и проварьировав показатели степени величин, входящих в формулу для Ca, сделан вывод, что с наименьшей относительной погрешностью адмиралтейский коэффициент коррелирует со скоростью хода (рис. 11) при следующих степенных значениях:

$$Ca = \frac{V^{3,5} D^{2/3}}{N}. \tag{9}$$

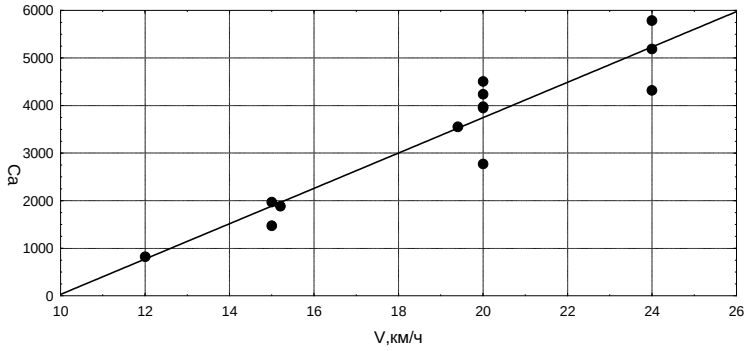


Рис. 11. Зависимость адмиралтейского коэффициента от скорости

Аналитическая зависимость адмиралтейского коэффициента от скорости судна выражается в следующем виде:

$$Ca = 371{,}572V - 3685{,}978 \pm 371{,}298. \tag{10}$$

Полученные выше зависимости могут быть использованы на начальном этапе проектирования при обосновании главных размерений обстановочных судов внутреннего плавания. Однако при проектировании нового судна полностью опираться на статистические данные не вполне корректно. Для целей обновления флота необходимо более точное определение проектных параметров через их оптимизацию, учитывая как эксплуатационные, так и экономические ограничения с рассмотрением их в комплексе. Выбирая оптимальные значения элементов проектируемого судна необходимо учитывать все ожидаемые последствия принимаемых решений. Это позволит получить качественно новый проект обстановочного судна с наилучшими экономически обоснованными показателями, позволяющими с должной производительностью выполнять возложенные на него функции.

Список литературы

[1] Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) [Электронный ресурс] // Водный транспорт России:[интернет-портал]. [2010]. URL: http://www.morinfocenter.ru/inland_wfleet.asp (дата обращения: 17.02.2011).
[2] Федеральная целевая программа «Развитие транспортной системы РФ на 2010–2015 годы». Министерство транспорта РФ. – 2008. – 363 с.

ANALYSIS OF COMPONENTS AND CHARACTERISTICS OF INLAND WATERWAY BUOY-LAYING VESSELS

V.V. Anisimova

The article gives an analysis of components and characteristics of inland waterway buoy-laying vessels. Statistical dependencies are produced for finding them at the initial stage of design.

УДК 621.791.94.03:629.5.011

Ю.А. Архипова*, студент ф-та КГиЗОС ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
Е.Г. Бурмистров*, д. т. н., проф. ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 5А.
А.В. Ганичев, *технич. директор ОАО «Судоремонтно-судостроительная корпорация».*
606505, г. Городец, Нижегородская обл., 1-й Пожарный переулок, 1.

ОБОСНОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО СУДОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ НОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ

Актуализируется вопрос применения современных технологий при строительстве железобетонных и композитных судов. Обосновывается новый метод монолитного железобетонного судостроения. Приводится вариант конструктивного решения, адаптированного для строительства корпусов судов по новой технологии. Излагаются общие подходы к решению частных вопросов строительства судов из железобетонных. Описываются возможности современной техники для приготовления, транспортировки и подачи бетона к местам бетонирования.

Применение железобетона для постройки морских судов и судов внутреннего плавания получило широкое распространение. Использование железобетона в качестве материала корпуса и надстроек позволяет значительно сократить расход стали и затраты на ремонт, при этом срок эксплуатации таких судов значительно увеличивается. К настоящему времени накоплен большой опыт в области проектирования, строительства и эксплуатации железобетонных судов различных типов.

Преимуществом железобетона в качестве судостроительного материала является большая экономия металла. На одну тонну грузоподъёмности расход стали при постройке железобетонного судна сокращается в (3…4) раза по сравнению с цельнометаллическими судами. Для постройки железобетонных судов, как правило, требуется достаточно простое оборудование, стоимость которого относительно мала, особенно в сравнении со стоимостью оборудования верфей стального судостроения. Наличие большей части инертных материалов (песок, гравий) непосредственно в районах строительства таких судов сокращает транспортные расходы. Сравнительная простота конструкции железобетонных судов и их строительства, доступность и относительно

невысокая стоимость используемых материалов делают в итоге их себестоимость на порядок меньше себестоимости стальных судов. К числу преимуществ железобетонных судов следует отнести также лёгкость ремонта, быстроту постройки, огнестойкость. Основным же недостатком железобетонного судна является относительно большой вес корпуса в сравнении со стальным. При одинаковой грузоподъёмности его корпус в (1,5…2,0) раза тяжелее стального. Это ограничивает применение и развитие железобетонного судостроения областью специальных плавучих сооружений: доков, паромов, переправ, дебаркадеров и т. п.

И на отечественных и на зарубежных верфях при строительстве железобетонных и композитных судов, как правило, применяют технологии секционного и монолитно-секционного судостроения, считающиеся более прогрессивными и, по этой причине, перспективными. Технологии монолитного строительства, с которых собственно начиналось железобетонное судостроение, таким образом, оказалось не востребованы и длительное время не получали развития ни в методологическом, ни в организационно-технологическом смыслах.

В настоящее время, в связи с появлением новых марок судостроительных бетонов, современных технологий бетонирования и высокопроизводительного оборудования интерес к монолитному железобетонному судостроению вновь возрастает. В этой связи актуальными становятся вопросы как разработки новых конструктивных решений по отдельным корпусным конструкциям и корпусу в целом, так и вопросы, касающиеся новых технологических способов и методов постройки судов.

Известно, что при конструировании элементов корпуса очень важно достичь минимальных стоимости, веса и материалоёмкости конструкций, снизить трудоёмкость их изготовления, обеспечить их конструктивную и технологическую унификацию.

При секционном и монолитно-секционном методах строительства и традиционной конструкции корпуса (рис. 1, *а*, *б*) весьма значительная трудоёмкость приходится на омоноличивание межсекционных соединений и выполнение сопутствующих вспомогательных операций (распалубка, обрубка облоя, выравнивание и соединение выпусков арматуры и т. д.). При этом в местах межсекционных соединений достаточно сложно обеспечить необходимую прочность и надёжность конструкции. Монолитный метод с этой точки зрения более предпочтителен. Однако, при традиционном подходе, его применение ведёт к некоторому (в пределах (25…35)%) переутяжелению конструкции. В первую очередь это обусловлено необходимостью применения «безнаборного» варианта конструкции на днищевых перекрытиях. Однако и эта проблема может быть решена, например, путём применения разработанных авторами новых конструктивных решений (рис. 1, *в*).

Суть предложения заключается в формировании днищевых перекрытий набором наружу корпуса. Для стоечных судов такое решение вполне оправдано, так как сопротивление выступающих частей в этом случае не имеет сколько-нибудь существенного значения. В то же время ровная внутренняя поверхность перекрытия значительно упрощает размещение и монтаж на нём судового оборудования, механизмов, систем, трубопроводов и проч. Укладка арматурных сеток и заливка бетона производится в подготовленную форму-опалубку, которая может набираться из модульных элементов на всю длину и ширину формируемого корпуса. Конструкции, выполненные по такой технологии, практически не будут иметь швов, следствием чего является отсутствие проблем со стыками и их герметизацией, а также повышение теплотехнических и изоляционных свойств корпусов судов. Расход стали в этом случае снижается на (7…20)%, а бетона – до 15% по сравнению со сборными конструкциями.

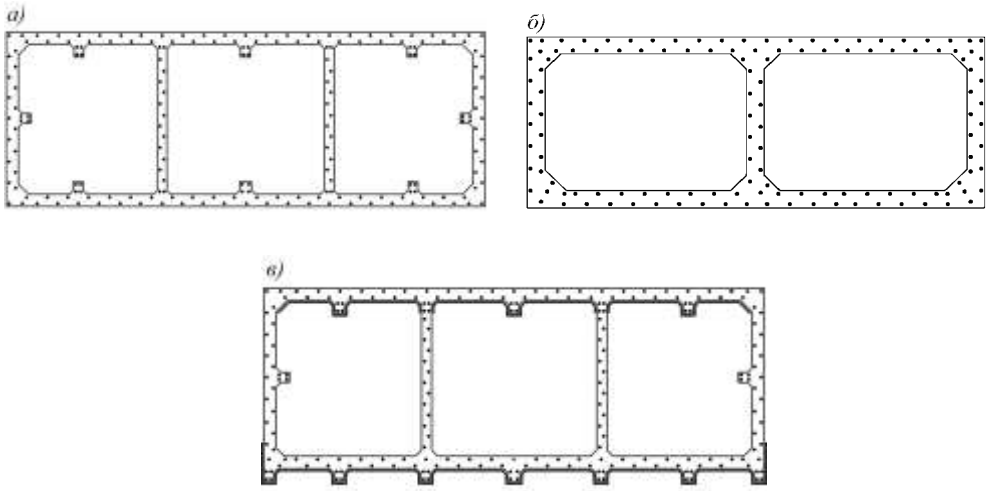


Рис. 1. Традиционные сборная (*а*) и монолитная (*б*) конструкция железобетонных судов и перспективная (*в*) конструкция, адаптированная для строительства монолитным методом по новой технологии

Важной особенностью данного предложения является то, что технология изготовления корпусов судов при этом существенно не изменяется. Основными этапами строительства остаются: монтаж специальных формы – опалубки, повторяющих контуры будущей конструкции; установка каркаса из арматуры; заливка бетоном; демонтаж опалубочных элементов. Трудоёмкости перечисленных этапов остаются на уровне традиционных: устройство опалубки – (25…35)%, армирование – (15…25)%, бетонирование и уход за бетоном – (20…30)%, распалубка – (20…30)%, либо уменьшаются примерно на 10%. Завод-строитель, таким образом, может работать по освоенной технологии, внеся в неё лишь незначительные коррективы.

Опалубка для строительства судов может быть различной: деревянной, металлической, деревометаллической, железобетонной, армоцементной, из синтетических или прорезиненных тканей... Во всех случаях конструкция опалубки должна обеспечивать достаточную прочность, надёжность и простоту монтажа и демонтажа её элементов, возможность укрупнённой сборки и широкую вариантность компоновки при минимальной номенклатуре опалубочных элементов.

Деревянную опалубку (см. рис. 2) изготовляют из древесины влажностью не более 25%. Для изготовления элементов опалубки применяются доски, древесностружечные и древесноволокнистые плиты. Лесоматериалы и материалы, полученные на основе древесины, изготовляют из хвойных и лиственных пород дерева. Применяемые для устройства опалубки стойки лесов высотой более 8,0 м, а также прогоны, поддерживающие опалубку, изготавливают только из древесины хвойных пород. Для прочих элементов опалубки и креплений применяют древесину лиственных пород – осину, ольху и др. При изготовлении деревометаллических щитов для обшивки применяется берёзовая древесина. Для облицовки щитов применяют водостойкую бакелизированную фанеру или листовые стеклопластики. Для снижения адгезии с бетоном и повышения качества лицевых бетонных поверхностей используют также покрытие щитов плёнками на основе полимеров.

Металлическую опалубку изготовляют из стальных листов толщиной (1,5…2,0) мм и прокатных профилей; она должна иметь быстроразъёмные соединения. Металлические части деревометаллической опалубки (см рис. 3) также изготовляются из стальных листов. Размер ячеек металлической сетки, применяемой в качестве сетчатой опалубки, не должен превышать 5,0×5,0 мм.

Рис. 2. Вариант применения деревянной опалубки

Рис. 3. Деревометаллическая опалубка для формирования вертикальных корпусных конструкций (бортов, продольных и поперечных переборок и выгородок)

Железобетонная опалубка представляет собой железобетонные плиты-оболочки. Они устанавливаются как элементы опалубки до начала бетонирования и являются наружной частью возводимой конструкции, монолитно с ней связанной (вариант несъёмной опалубки).

Армоцементная опалубка применяется в виде армоцементных плит толщиной (15…20) мм. Такие плиты изготовляют из мелкозернистого бетона, армированного проволочной сеткой. Сетку до нанесения слоя бетона можно изогнуть, придав бетонируемой плите необходимый криволинейный профиль (актуально при формировании оконечностей самоходных железобетонных судов). Для этих же целей весьма перспективно использование в качестве опалубки оболочек из синтетических или прорезиненных тканей с нагнетанием воздуха в их внутреннее замкнутое пространство. Оболочке при этом может быть придана практически любая форма.

Пенополистирольная опалубка (рис. 4) представляют собой две пластины из плотного пенополистирола, соединенные между собой прочными перемычками (ещё один вариант несъёмной опалубки). Пластины, соединённые таким образом, образуют полости, которые в процессе бетонирования армируются и заполняются бетоном. Верхняя и нижняя плоскости элементов такой опалубки снабжены специальными замками сложной формы, подобно сборным элементам популярной детской игры «LEGO». Их конструкция позволяет отказаться от применения временных подпорных элементов и идеально выдерживает геометрические размеры стен, обеспечивая герметичность соединений и блокируя вытекание бетона.

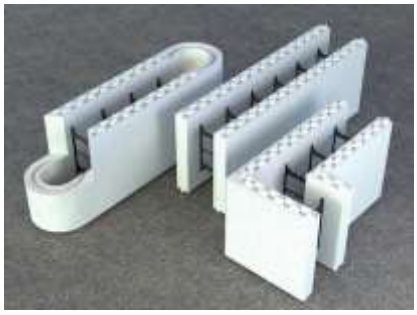


Рис. 4. Элементы несъёмной пенополистирольной опалубки

На внутренних поверхностях все блоки имеют пазы в форме «ласточкин хвост», что обеспечивает надёжность сцепления бетона со стенками блока. Пенополистирольная несъёмная опалубка является идеально ровной поверхностью, готовой под отделку любыми материалами и, сама по себе, обладает хорошими теплоизоляционными свойствами. Элементы декоративной отделки крепятся непосредственно на полистирол либо с помощью клеевых составов, либо стандартным механическим крепежом в тело бетона.

Кроме описанных разновидностей опалубки, разработаны и применяются её варианты с подогревом для ускорения процессов гидратации и сокращения сроков созревания бетона, со встроенными вибраторами для его уплотнения и т. д.

Важной проблемой строительства железобетонных судов является уменьшение сцепления бетона с опалубкой. Сцепление зависит от адгезии (прилипания) и когезии (прочности на растяжение пограничных слоёв в местах контакта «опалубка-бетон») бетона, его усадки и характера формирующей поверхности опалубки. Адгезия заключается в том, что при укладке и виброуплотнении бетонная смесь приобретает свойства пластичности и поэтому сплошность контакта между ней и опалубкой возрастает. Если опалубка выполнена из слабо смачивающихся (гидрофобных) материалов, например, пластиков, текстолита и проч., и имеет гладкую поверхность, сцепление с ней незначительно. Если же она выполнена из сильно смачивающихся (гидрофильных) материалов, например, стали, дерева и т. п., имеет шероховатую поверхность или пористую структуру, сплошность и прочность контакта возрастают и, следовательно, увеличивается адгезия. Если адгезия мала, а когезия велика, при распалубке отрыв происходит по плоскости контакта и формующая поверхность опалубки остается чистой, а лицевые поверхности забетонированной конструкции получаются хорошего качества. Адгезию можно уменьшить, используя для формующих поверхностей опалубки гидрофобные материалы, а также нанося на поверхность опалубки специальные смазки и противоадгезионные гидрофобиризующие покрытия. Наиболее практичны комбинированные смазки в виде так называемых обратных эмульсий. В них, помимо гидрофобизаторов и замедлителей схватывания, вводят пластифицирующие добавки, которые пластифицируют бетон в зоне контакта с опалубкой и облегчают её отрыв.

Новые технологии можно использовать не только в формообразовании перекрытий корпусных конструкций, но и в процессах изготовления арматурных сеток. Уже сегодня сварка арматуры в сетках успешно заменена её связыванием с использованием специальных вязальных пистолетов. Такой технологический приём позволяет значительно снизить затраты ручного труда на основных операциях данного технологического процесса, обеспечить гарантированную постоянную силу затяжки проволоки и сократить число рабочих, занятых на вязке арматуры в (2…3) раза при увеличении производительность их труда в (5…6) раз.

Для заливки бетона в подготовленную опалубку можно использовать стационарные бетононасосы с дизельным или электроприводом, либо автобетононасосы. Ста-

ционарные бетононасосы (рис. 5) с дизельным приводом более автономны, поэтому имеют большее распространение, чем бетононасосы с электроприводом. Однако, вторые более экологичны и менее шумны, поэтому незаменимы при производстве работ в цеховых условиях.

Рис. 5. Стационарный бетононасос с дизельным приводом

К особенностям современных бетононасосов можно отнести:

▪ возможность продолжения работы при отказе электрики или концевых датчиков, благодаря чему возможно закончить выработку бетона или выполнить непрерывный цикл работ;

▪ бесступенчатая регулировка и автоматическая коррекция производительности;

▪ автоматическая централизованная смазка перемешивающих шнеков и задвижки сливного отверстия приёмного бункера.

В автобетононасосах (рис. 6) привод осуществляется от двигателя шасси. Электронная система управления насоса интегрируется в бортовой компьютер автомобиля и координирует все основные операции от забора и раствора до подачи и распределения его в районе производства работ. Сама бетоноподающая установка включает в себя насос, раздаточную стрелу и систему опор. Подача бетона может осуществляться при значительном (до 100 м) удалении бетононасоса от места бетонирования.

Рис. 6. Общий вид автобетононасоса в транспортном положении

Таким образом, достигнутый к настоящему времени уровень развития техники и технологий делает вполне обоснованным интерес судостроителей к возобновлению строительства железобетонных судов монолитным методом. Новые решения в конструкции корпусов таких судов позволяют повысить их технологичность и делают железобетонное судостроение ещё более экономичным с точки зрения материало- и трудоёмкости.

Список литературы

[1] Сиверцев И.Н. Железобетонное судостроение: учебное пособие / И.Н. Сиверцев. – М.: изд-во МРФ. – 1947. – 479 с.
[2] Егоров. Н.Е. Технология постройки железобетонных судов / Н.Е. Егоров. – М.: Речной транспорт. – 1961. – 191 с.
[3] Современная опалубка для монолитного строительства. URL: http://www.pekomo.ru/stati/sovremen-naya-opalubka-dlya-monolitnogo-stroitelstva.html
[4] Установки для приготовления бетонной смеси и строительного раствора. URL: http://www.betono-ved.ru/data/oborud/ob3.php http://www.kamag.com/en.html.
[5] Машины и оборудование для транспортирования бетонных и растворных смесей. URL: http://stroi-logik.ru/tehnologiya/stroitelnye-mashiny/betonye-raboty/145-transportirovanie-betonnyh-i-rastvornyh-smesei.html.

STUDY OF MODERN METHODS OF CONSTRUCTING SHIPS USING FERROCONCRETE ON THE BASIS OF NEW CONSTRUCTION SOLUTIONS

U.A.* Arkhipova*, E.G. Burmistrov, A.V. Ganichev

The problem of applying modern technologies when constructing ferroconcrete and composite vessels is analysed. A study of a new method in which monolithic ferroconcrete is used has been made. An example of a construction solution adapted for building ship hulls using the new technology is given. General approaches are presented when solving particular problems of constructing ferroconcrete ships. The opportunities of modern technology are described for preparing, transporting and feeding concrete to concrete laying sites.

УДК 621.791.94.03:629.5.011

***Е.Г. Бурмистров**, д. т. н., проф. ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
***С.В. Студнев**, аспирант-стажёр ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
***Т.А. Михеева**, к. т. н., ст. преподаватель ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 5А.

ПЕРСПЕКТИВНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ РЕЗКИ НА ЛОМ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОТХОДОВ СУДОХОДСТВА

Обосновывается актуальность проблемы утилизации судов. Излагаются общие подходы к совершенствованию соответствующих производственных процессов. Актуализируется вопрос механизации процессов разделительной резки. Описывается разработанная авторами перспективная установка для разделительной резки на лом крупногабаритных отходов судостроения и судоходства.

Актуальность проблемы утилизации выработавших свой ресурс судов внутреннего плавания обусловлена тем, что в акваториях судоремонтных заводов и баз технического обслуживания флота скопилось большое количество выведенных из эксплуатации и брошенных судов. По данным Верхне-Волжской инспекции Российского Речного Регистра, только в бассейне р. Волги насчитывается более 1100 таких судов, многие из которых находятся в притопленном или затопленном положениях [1]. Кро-

ме явной опасности для судоходства они представляют собой и серьёзную экологическую опасность.

В отличие от предприятий Министерства обороны, на которых утилизация надводных кораблей и атомных подводных лодок осуществляется в соответствии с государственным оборонным заказом и при соответствующем финансировании, для промышленных предприятий внутреннего водного транспорта такие программы только продекларированы. В то же время в ближайшее десятилетие более 60% [2] современного парка флота будет выведено из эксплуатационного оборота по причинам:

- полной выработки ресурса;
- наступления критического срока эксплуатации (или плановой утилизации);
- морального и физического износа и отрицательных результатов экономического обоснования возможности очередного капитального ремонта и модернизации;
- серьёзных аварий или других обстоятельств, не допускающим возможность проведения экономически обоснованных ремонтно-восстановительных работ.

Масштабность данной проблемы диктует разработку новых индустриальных подходов к процессу утилизации судов. Наиболее рациональным представляется организация для этих целей специализированных региональных центров, оснащённых соответствующей техникой и технологиями и располагающих квалифицированным производственным персоналом.

С точки зрения совершенствования процесса судоразделки наибольшие перспективы имеет комплекс работ, связанных с разделкой корпуса судна на крупногабаритные разделяемые элементы и их последующей дорезкой на габаритный металлолом (металлургический кусок).

Для разделки корпусов судов на лом, как правило, используют термический, механический и импульсный методы резки [3]. Определённые перспективы имеют и взрывные технологии судоразделки. Однако, несмотря на такое разнообразие освоенных технологий, более 65% всего объёма работ по разделительной резки судовых конструкций в настоящее время производится с использованием ручных газовых резаков и плазмотронов. И это отнюдь не реалии только российской действительности. В мировых центрах судоразделки (Китай, Тайвань, Вьетнам и др.) доля ручного труда доходит до 75%! Таким образом, весьма актуальной является проблема механизации процессов резки.

Кроме главного и общего для всех способов резки требования – дешевизны судоразделки – к числу основных требований к судоразделочному оборудованию и средствам механизации можно отнести их простоту, надёжность, компактность, высокую производительность. Последний фактор в данном случае определяется не только и не столько скоростью резки, сколько количеством вспомогательных операций и надёжностью оборудования, позволяющего производить резку с минимальным объёмом подготовительных операций (изготовление лесов, подмостей и переходов, установка ограждений, закрепление оборудования на разрезаемой поверхности, подготовка разрезаемой поверхности металла для собственно резки и т.д.).

Выбор метода разделки зависит от условий производства работ, конструкции корпуса и габаритов судна, а также габаритов получаемого металлургического куска. Исходя из этого, авторами разработана установка для разделительной резки на лом крупногабаритных отходов судоходства. Общий вид установки представлен на рис. 1.

Установка представляет собой портативную, мобильную установку, способную выполнять разделительную резку не только в нижнем положении на горизонтальных поверхностях, но и на наклонных и вертикальных поверхностях. Крепление установки к разрезаемой поверхности производится при помощи постоянных или электромагнитов.

В зависимости от выбранного способа резки, установка может оснащаться 1–2-мя газовыми резаками, либо плазмотроном.

Для повышения экологической безопасности процесса резки установка оборудована системой отсоса образующихся вредных веществ.

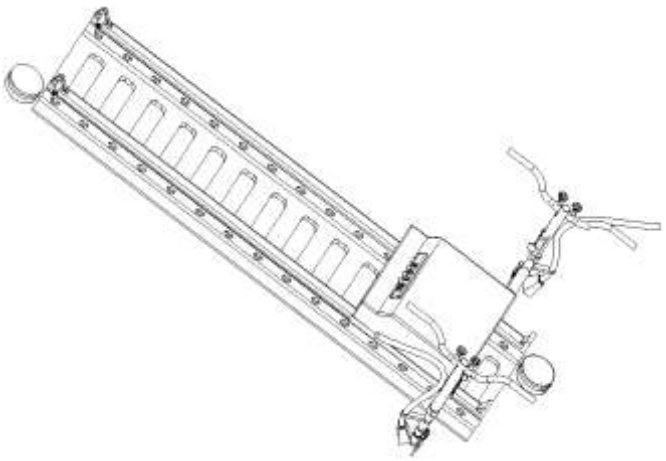
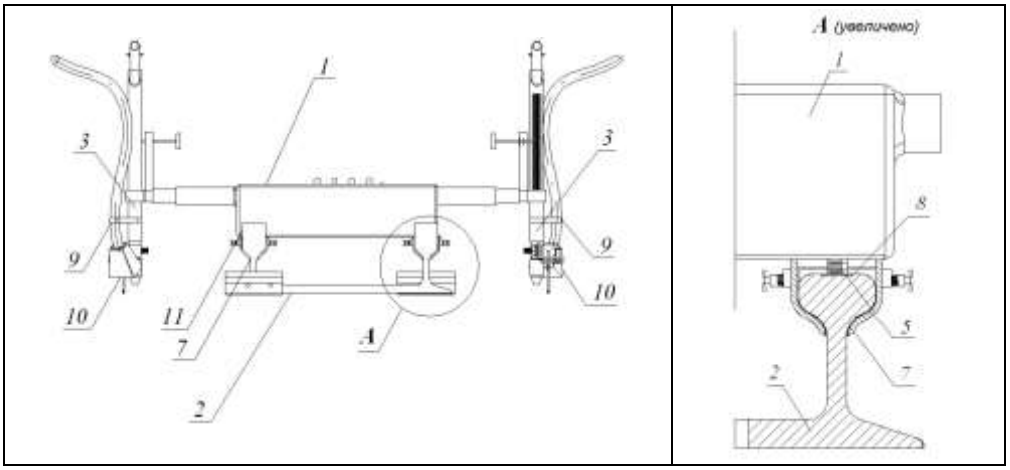


Рис. 1. Общий вид установки для разделительной резки на лом крупногабаритных отходов судоходства



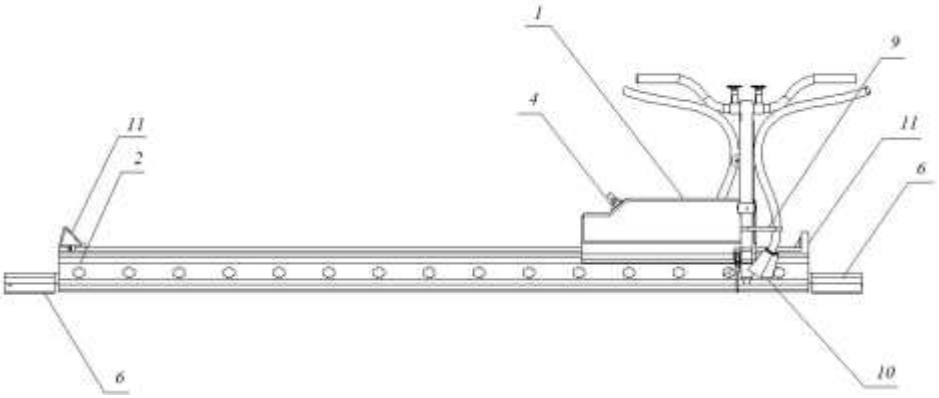


Рис. 2. Основные узлы и устройство установки для разделительной тепловой резки на лом крупногабаритных отходов судоходства: 1 – каретка; 2 – направляющая рейка; 3 – резак; 4 – система управления; 5 – привода каретки; 6 – электромагнит; 7 – кронштейн;

8 – зубчатая рейка; 9 – кронштейн крепления отсасывающего устройства;
11 – ограничитель стационарный

Конструкция установки и отдельных её узлов запатентована в России. В настоящее время обсуждается вопрос её серийного производства, а также продажи лицензий на производство заинтересованным организациям и физическим лицам.

Установка для термической резки содержит (см. рис. 2) каретку *1*, которая перемещается по направляющей рейке *2*. На каретке устанавливаются резаки *3*, по меньшей мере, один. С помощью системы управления *4* производится регулирование процесса резки. Перемещение каретки *1* осуществляется с помощью привода *5* каретки. Устройство крепится к разделываемой поверхности с помощью электромагнитов *6*, а каретка *1* крепится к направляющей рейке с помощью кронштейнов *7*. Перемещение каретки обеспечивается за счёт передачи между зубчатой рейкой *8* и роликами каретки. На стойке резака *3*, посредством кронштейнов *9*, устанавливается отсасывающее устройство *10*. Упоры *11* обеспечивают ограничение перемещения каретки *1* вдоль направляющей рейки *2*. С другого конца рейки имеются съёмные «башмаки», обеспечивающие возможность её наращивания по длине.

Применение таких установок позволяет сделать процесс судоразделки не только самоокупаемым, но и прибыльным. При примерной сопоставимости капиталовложений на организацию производства по традиционной схеме (с большой долей ручного труда) и по схеме, ориентированной на использование высокоэффективных средств механизации, а также при условии высокого уровня организационно-технологической подготовки производства, использование компактных механизированных установок для разделительной резки позволяет более чем в 2 раза снизить общую трудоёмкость разделки корпусов судов и примерно во столько же раз уменьшить производственную себестоимость их утилизации в целом. Организацию технологического процесса утилизации судна в этом случае легко осуществить через разбивку корпуса судна на отдельные элементы, габариты которых:

- диктуются требованиями получателя лома;
- определяют затраты на метало-резательные операции;
- формируются производственными и технологическими условиями;
- определяются способом транспортировки лома.

Линии реза при этом назначаются в соответствии с общей технологической последовательностью разделки: корпус → блок корпуса → секция → металлургический кусок [4]. Таким образом, весь процесс судоразделки можно подчинить единому экономически и технологически обоснованному плану. Кроме упорядочения работ на всех стадиях утилизации судна, это позволит существенно снизить и возникающие при судоразделке риски для производственного персонала, уменьшить общую травмоопасность основных судоразделочных операций.

Список литературы

[1] Горбунов В.С. Постановка задачи классификации судов, выведенных из эксплуатации по степени их экологической опасности / В.С. Горбунов, В.Л. Этин // Тр. ВГАВТ. – 2000, ВЫП. 292, ч. 4.

[2] Бурмистров Е.Г. Утилизация судов. Организационно-технологический и экологический аспекты / Е.Г. Бурмистров, А.С. Курников, И.А. Сычёва // Журн. Экология и промышленность России. – 2005, №10. – С. 24 – 27.

[3] Перов В.Н. Технология утилизации судов: Учебное пособие / В.Н. Перов. – Николаев: УГМТУ, 2002. – 24 с.

[4] Горбунов Ю.В. Технология утилизации судов и других отходов судоходства: конспект лекций / Ю.В. Горбунов, О.К. Зяблов. – Н. Новгород: изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2006. – 144 с.

PROSPECTIVE INSTALLATION FOR SEPARATION CUTTING FOR SCRAP OF LARGE SIZED VESSEL WASTE ITEMS

E.G. Burmistrov, S.V. Studnev, T.A. Mikheeva

A study has been made of the problem of utilization of vessels. General approaches to improving corresponding production processes are given. The problem of mechanizing the processes of separation cutting is underlined. A prospective installation developed by the authors is described for separation cutting for scrap of large sized vessel and navigation waste items.

УДК 629.5.081: 681.51

Д.А. Галочкин, *аспирант, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
Е.Г. Бурмистров, *д. т. н., проф.,ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГРАФИКОВ ПОСТРОЙКИ СУДНА С УЧЁТОМ ЗАКОНОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛОГИСТИКИ

Рассматриваются общие подходы к вариантам использования законов производственной логистики при разработке Генерального графика постройки судна, а также технологических графиков подготовки производства. Приводятся основные этапы разработки Генерального и технологического графиков методами имитационного моделирования подготовки производства к постройки судов и краткое их описание.

Генеральный и технологический графики постройки судна является важными элементами прогнозирования производственного процесса постройки судна, помогают правильно организовать, регулировать производство и обеспечить успешное выполнение производственной программы. И те и другие графики обычно разрабатываются в ленточном или сетевом исполнении. Укрупнённый Генеральный график создаётся на начальной стадии конструкторской подготовки производства и определяет сроки выпуска заказной документации и рабочих чертежей, начала работ по закладке, постройке и спуску на воду, достройке и сдаче судна заказчику. В дальнейшем Генеральный график уточняют и выполняют в виде сетевой модели, содержащей более 200 работ-событий по проектированию, подготовке производства, постройке и сдаче судна. Исходя из него составляют межцеховой генеральный график и более детальные технологические, цикловые, оперативко-производственные и др. графики.

Технологические графики являются наиболее эффективными организующими документами. В них отражают трудоёмкости работ, расчётные данные по численности и специальностям рабочих, показывают продвижение работ по обработке металла корпуса, сборке секций, изготовлению труб, монтажу механизмов, достройке, отделке и т.д. Именно в соответствии с этими графиками составляют таблицы платежей, согласно которым Заказчик оплачивает стоимость судна по мере роста его технической готовности.

Обычно при разработке Генерального и технологического графиков весь производственный процесс постройки судна разделяют на периоды и технологические этапы. На отдельные крупные этапы составляют оперативно-производственные графики, содержащие более подробный перечень работ, выполняемых несколькими цехами и участками. На основе технологических и оперативно-производственных графиков

производят распределение работ между цехами. При этом стремятся организовать производство по замкнутому циклу, то есть выполнять все технологические операции по изготовлению деталей, узлов и секций в пределах одного цеха или участка для исключения транспортных перевозок, хранения в промежуточных складах и других вспомогательных операций.

С учётом высокой сложности и необходимости применения методов прогнозирования развития производства разработке Генерального и технологического графиков, оптимальным представляется распределение трудоёмкости при их составлении по основным видам работ в хронологическом порядке с учётом законов производственной логистики и с применением методов имитационного моделирования. Производственный процесс постройки судна в этом случае целесообразно разделять на частные производственные процессы, образующие классификационные категории производства – виды производств. Материальные потоки всех видов производств в пространстве расположены в цехах, на производственных участках и на определенных рабочих местах, то есть или на совокупности производственных участков (цех), или совокупности групп рабочих мест (производственный участок), организованных по предметным, технологическим или предметно-технологическим признакам. Так как реализация принципов логистики производственных процессов имеет целью повышение организованности производственных систем, то движение материальных потоков в пространстве, очевидно, должно подчиняться законам производственной логистики. К их числу относятся: закон упорядоченности движения предметов труда, закон непрерывности хода производственного процесса, закон ритма производственных циклов и закон календарной синхронизации [1].

Виды производств совместно функционируют не только в пространстве, но и во времени. Законы производственной логистики в данном случае выступают как инструмент управления каждой производственной микрологистической подсистемой (то есть видом производства – частным производственным процессом) в отдельности и всем производственным процессом в целом (в этом случае производственный процесс выступает как логистическая система). Поэтому разработка Генерального и технологических графиков должна вестись с учётом:

- координации производственного процесса, заключающегося в формулировании и доведении целей управления материальными потоками до отдельных микрологистических систем, в согласовании отмеченных целей с глобальными целями верфи и обеспечении на этой основе совместной слаженной работы всех звеньев производственной логистической цепи;
- организации материальных потоков в производстве, предполагающей формирование и установление пространственных и временных связей между подсистемами, а также создание системы управления материальными потоками верфи;
- планирования движения материальных потоков, включая выполнение таких подфункций, как научно-техническое и экономическое прогнозирование, разработка программы действий и детализация планов. Прогнозирование предшествует разработке собственно планов и составлению программы действий;
- удовлетворения потребностей верфи в материалах с максимально возможной экономической эффективностью, выдерживания обоснованных сроков закупки сырья и комплектующих изделий (материалы, закупленные ранее намеченного срока, ложатся дополнительной нагрузкой на оборотные фонды предприятий, а задержка в закупках может сорвать производственную программу или привести к её изменению).

Максимальное использование рабочего времени является одной из основных задач производственной логистики, а, соответственно, задач, решаемых при разработке Генерального и технологических графиков. Наиболее эффективно она может быть решена на основе предварительного расчёта технологической трудоёмкости постройки судна. При разработке графиков технологическая трудоёмкость рассчитывается как сумма трудоёмкостей технологических этапов, комплектов и операций по следу-

ющим видам работ: обработка деталей корпуса; сборка узлов и секций корпуса; формирование корпуса судна; трубомонтажные работы; механомонтажные работы; малярные и изоляционные работы; достроечные виды работ; все виды испытаний; работам МСЧ. Величину технологической трудоёмкости определяют на основе рабочей конструкторской и технологической документации методами нормирования труда, то есть установления необходимых для выполнения производственного процесса трудозатрат. В состав методов нормирования труда входят: анализ конкретного трудового процесса, дифференциация его на отдельные приёмы труда и режимы работы оборудования, определение их (и всего трудового процесса) продолжительности на основе применения нормативных материалов по труду (трудовых нормативов) [2].

При разработке Генерального и технологических графиков применяют два вида норм: технически обоснованные и опытно-статистические. Технически обоснованные нормы времени учитывают время, необходимое и достаточное для выполнения заданной работы с учётом полного использования оборудования и инструмента, применения рационального технического процесса и передовых форм организации труда и обслуживания рабочего места, исключающих потери рабочего времени. Они рассчитывается на основе: уровня производительности труда рабочего соответствующей квалификации; разработки наиболее рационального технологического процесса с применением механизированного производственного оборудования и инструмента; применения рациональной организации рабочего места; целесообразного совмещения смежных работ. Опытно-статистические нормы времени учитывают время, устанавливаемое на основе личного опыта нормировщика и (или) мастера, а также по данным статистического учёта трудовых затрат на ранее выполненные аналогичные работы с учётом необходимых поправок на применяемые материалы, размеры, форму и т.п. Такие нормы времени являются временными и вводятся на период освоения новой продукции или нового технологического процесса.

Рассчитать технологическую трудоёмкость судна как сумму трудоёмкостей всего множества операций технологического процесса постройки судна возможно только при наличии всей конструкторской, технической и технологической документации или после завершения строительства головного судна серии. Однако, даже в этом случае технологическая трудоёмкость не является величиной постоянной. Она может повышаться из-за конструктивных изменений в проекте или снижаться благодаря технологическим и организационным улучшениям в подготовке и обеспечении производства. С учётом этого, а также в связи с тем, что современное судостроение требует широкого использования информационных технологий целесообразно применение при разработке Генерального и технологических графиков методов имитационного компьютерного моделирования [3]. Планирование и разработку указанных графиков на ранних стадиях проектирования в этом случае можно осуществлять с учётом конкретного состояния производства, основных производственных характеристик верфи и рациональной загрузки оборудования. Результатом будет являться достаточно точные оценка технологической трудоёмкости и календарные сроки решения ряда задач, в частности:

– обеспечение производства конструкторской, технической и технологической документаций;

– обеспечение производства материалами и комплектующими, необходимыми для выполнения заданного объёма работ;

– проектирование и изготовление, а также закупка технологического оборудования, оснастки и инструмента, необходимых для осуществления производственного процесса;

– обеспечение производства всеми видами энергии, используемыми в приводах оборудования, для освещения, отопления и т.д.;

– обоснование численного и квалификационного состава основных производственных и вспомогательных рабочих и инженерно-технических работников;

– собственно изготовление, испытания и сдача изделия Заказчику.

Исходя из отмеченного при разработке Генерального и технологического графиков необходимо использовать наиболее прогрессивные методы, основанные на современных методах организации, подготовки и управления производством, в том числе методы компьютерного моделирования и прогнозирования развития технологий, автоматизированного расчёта организационно-технологических показателей производства, принудительной календарной синхронизации производственных циклов.

Поскольку движение основных видов ресурсов в производстве представляет собой движение материальных потоков, то оптимальным методом управления ими является логистическое управление с принудительным обеспечением заданного ритма работы отдельных цехов, производственных участков и производства в целом, а так же обеспечением всех производственных участков деталями, комплектующими, изделиями МСЧ, узлами и секциями «точно в срок», то есть без промежуточного складирования и хранения сборочных единиц. Конечной целью этого метода является своевременная и комплектная подача сборочных единиц на стапель при соблюдении закона упорядоченности труда, законов ритмов производственных циклов и их календарной синхронизации, то есть законов логистики.

Перечисленные законы применимы и к условиям непоточного производства. Минимизация затрат на производство в этом случае может быть обеспечена за счёт организации непрерывной загрузки микрологистических подсистем (цехов, производственных участков, отдельных рабочих мест), при максимально возможной непрерывности движения предметов труда в производстве.

Состав объектов логистического управления материальными потоками верфи и в том и в другом случае может быть проиллюстрирован схемой, приведённой на рис. 1.

Рис. 1. Состав объектов логистического управления материальными потоками верфи

Принципы логистики производственных процессов: синхронизация, оптимизация и интеграция – служат основным методологическим подходом к повышению организованности и эффективности функционирования производственных систем. Главным «инструментом» логистического подхода является анализ и синтез этих систем [4]. *Анализ* производственной системы позволяет выявить наиболее существенные факторы, дать им характеристику, количественную оценку взаимодействия факторов друг с другом, определить влияние их на параметры системы. *Синтез* обеспечивается в процессе разработки формализованных моделей технологии и расчёта их параметров.

Если при традиционной системе управления стремятся обеспечить минимум издержек в каждом из звеньев материального потока, то при логистическом управлении – оптимальность всей совокупности процессов. Наглядно это можно представить в форме записей целевых функций:

▪ при традиционном управлении $L(C) = \min C_{\text{С}} + \min C_{\text{П}} + \min C_{\text{Т}}$;

▪ при логистическом управлении $L(C) = \min\left(C_{\text{С}}^{\text{опт}} + C_{\text{П}}^{\text{опт}} + C_{\text{Т}}^{\text{опт}}\right)$,

где $C, C_{\text{С}}, C_{\text{П}}, C_{\text{Т}}$ – суммарные затраты и затраты соответственно на снабжение, производство и транспортировку материалов, полуфабрикатов и готовых изделий;

$C_{\text{С}}^{\text{опт}}, C_{\text{П}}^{\text{опт}}, C_{\text{Т}}^{\text{опт}}$ – оптимальные значения каждого из слагаемых.

Таким образом, в целом логистическое управление производством. В том числе посредством грамотного составления Генерального и технологического графиков, должно обеспечить решение следующих вопросов:

1) как следует разместить производственные участки;

2) как осуществить выбор средств технологического оснащения (СТО);

3) как осуществлять производственно-календарное планирование;

4) как осуществлять выбор структуры внутрипроизводственной транспортной системы;

5) как осуществлять контроль за ходом производственных процессов;

6) как создать и распределить систему промежуточного складирования?

Имитационная модель производственной логистической системы постройки судна является наиболее логичной и удобной базой для получения объективных данных для разработки Генерального и технологических графиков на ранних этапах производства к постройке судна.

Процесс создания такой модели формально можно разделить на 5 этапов.

1. *Формирование целей моделирования.* Анализ поставленной задачи необходимо начинать с детального изучения всех аспектов функционирования производства как логистической системы. Поскольку рассматриваемые системы, как правило, связаны с другими системами или включает в себя ряд подсистем, то разработка имитационной модели должна основываться на системном подходе. При этом возможно разделение общей задачи моделирования на несколько частных [5].

Так как процесс постройки судна характеризуется наличием большого количества взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом подсистем, то на первоначальном этапе необходимо правильно сформулировать цели. От формулировки целей в значительной степени зависит выбор типа и характер разрабатываемой модели, а также дальнейшее исследование её поведения.

В ходе составления содержательного описания объекта моделирования должны быть установлены границы изучения логистической производственной системы и дано описание всех подсистем в ней (и с ней) взаимодействующих. Кроме того, должны быть сформулированы основные критерии эффективности, по которым предполагается проводить сравнение различных вариантов производственных решений, выполнена генерация и описание возможных альтернатив.

2. *Разработка концептуальной модели производственной системы* – переход от реальной системы к логистической схеме её функционирования, то есть описание производственной логистической системы постройки судна с помощью математических зависимостей, а так же алгоритмизация функционирования её микрологистических подсистем (обработка деталей корпуса, сборка узлов и секций корпуса, формирование корпуса, трубомонтажные работы, механомонтажные работы и т.д.), которая включает в себя статическое и динамическое описание системы.

На начальном этапе формируется упрощенная модель производственной системы. Затем осуществляется поэтапная детализация модели и входящих в систему подсистем. Так как сама модель имеет иерархическую структуру, то её проектирование

должно вестись методом «от простого к сложному». Модель при этом постоянно усложняется путём добавления в неё новых элементов и взаимосвязей между ними. Основополагающим здесь является определение критериев эффективности функционирования системы и проработка различных альтернативных вариантов её развития. Принимаемые при проектировании технические решения зависят от достаточно большого количества факторов и, в первую очередь, от типа производства – единичное (индивидуальное), мелкосерийное, серийное или крупносерийное, – от конструктивных и технологических особенностей, от номенклатуры изделий и их массогабаритных характеристик, зависящих от выбранного технологического метода постройки судна (секционный, блочный, модульный и блочно-секционный). Особое внимание следует уделять взаимному расположению производственных участков, построечных мест, спусковых сооружений, достроечных набережных, транспортных магистралей, энергетических объектов и коммуникаций. Расположение производственных участков должно наиболее полно соответствовать принятому методу постройки судов.

На данном этапе для каждой логистической подсистемы производится планирование и нормирование технологического процесса изготовления типового изделия. В рамках планирования техпроцессов составляется полный перечень технологических операций в последовательности их выполнения, указываются режимы их отработки, необходимое оборудование, оснастка, инструмент, квалификация рабочих. В рамках его нормирования выполняются необходимые расчёты по определению трудоёмкости и продолжительности каждой операции, а также объёмов затрачиваемых материалов и энергоресурсов.

3. *Формализация имитационной модели.* Процесс формализации сложной логистической производственной системы включает выбор способа формализации и составление формального её описания, которое предполагает определение основных элементов моделируемой системы, их характеристик и взаимодействия между элементами. Описание может производиться с использованием таблиц, графиков, схем.

Основная задача данного этапа – алгоритмическое представление объекта моделирования. Цель формализации – получение формального представления логико-математической модели, т. е. алгоритмов поведения элементов (и подсистем) сложной системы и отладка на уровне моделирующего алгоритма вопросов взаимодействия этих элементов (и подсистем) между собой [6].

4. *Программирование имитационной модели.* На этом этапе концептуальное (или формальное) описание модели сложной системы необходимо преобразовать в имитационную модель и произвести выбор инструментальных средств для её реализации. После этого формализованное описание представляют в виде компьютерной программы с апробированием на ЭВМ.

5. *Испытание и исследование свойств имитационной модели.* После того, как имитационная модель реализована на ЭВМ, проверяют её адекватность. В случае необходимости производят соответствующую коррекцию, в том числе с использованием поправочных коэффициентов.

На рис. 2 представлен фрагмент Генерального графика постройки плавучего саморемонтного дока пр. 28140, разработанного на основе изложенных принципов. При этом были реализованы все описанные этапы, включая разработку концептуальной модели, формализацию, то есть разработку имитационной модели, её программирование, испытания и исследование её свойств. Проверка адекватности данной модели по критериям Фишера и Стьюдента показала, что точность оценки трудозатрат и сроков выполнения работ-событий составляет более 97%. Это существенно выше среднестатистической погрешности, получаемой при традиционном подходе к разработке подобных графиков.

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ГРАФИК СТРОИТЕЛЬСТВА ПЛАВУЧЕГО ДОКА ПР. 28140

№ п/п	НАИМЕНОВАНИЕ	Труд-ть, чел/час	2011						2012									
			ноябрь			декабрь			январь			февраль			… окт.			ноябрь	
1	Разработка РКД, ПТД	2500,44													…				
1.1	Технический проект	1350,23													…				
	Расчёты по теории кораб.	345,45													…				
	Корпус и прочность	322,56													…				
	Изоляция, обстройка устройств, дельные вещи	222,49													…				
	Общесудов. сис-мы, СЭУ	212,90													…				
	Электрооборудование	223,45													…				
	Финальные общепроект-ные документы	23,28													…				
1.2	Рабочий проект	1150,21													…				
	Корпус с насыщением	158,45													…				
	Общесудовые устрой-ства, дельные вещи	158,45													…				
	Обстройка, изоляция	158,45													…				
	Приёмо-сдаточная доку-ментация	216,25													…				
	Эксплуатационная доку-ментация	155,66													…				
2	Одобрение Регистром документации	100,00													…				
3	Закупка материалов и оборудования	-													..				
4	Изготовление МСЧ, МЗК	2305,23													…				
5	Строительство														…				
	Обработка металла кор-пуса 3-го модуля	2867,33													…				
	Обработка металла пон-тона 3-го модуля	1892,44													…				
	Обработка металла баш-ни правого борта понто-на 3-го модуля	630,813													…				
	Обработка металла баш-ни левого борта понтона 3-го модуля	630,813													…				
	Обработка металла кор-пуса 4-го блока	2867,33													…				
	Обработка металла пон-тона 4-го блока	1892,44													…				
…	……	…….													…				
…	……	…….													…				
14	Стыковка модулей 3 и 4	37420,9													…				
	Стыковка модулей 3 и 2	41163													…				
	Стыковка модулей 4 и 5	45279,3													…				
	Стыковка модулей 2 и 1	49807,2													…				
	Стыковка модулей 1 и 6	59768,7													…				
15	Швартовные испытания	4332,11													…				
16	Приёмо-сдаточные ис-пытания	4332,11													…				
17	Утверждение РКД	4332,11													…				

№ п/п	НАИМЕНОВАНИЕ	Труд-ть, чел/час	2011		2012			
			ноябрь	декабрь	январь	февраль	… окт.	ноябрь
	Трудоёмкость	749454	10560	22666	29768	51572	47833	
	Количество рабочих, чел		63	135	177	307	285	
	%% продвижения		- - -	2 5 7	10 13 16	19 21 23	85 90 95	97 100
№ п/п	%% готовности на конец планируемого срока		-	7	16	23	95	100

Рис. 2. Фрагмент Генерального графика строительства плавучего дока пр. 28140, разработанного с использованием методов имитационного моделирования на основе законов производственной логистики

Таким образом, имитационная модель позволяет уже на этапе разработки Генерального графика постройки судна, а также на ранних стадиях подготовки производства провести всесторонний анализ характеристик производственной системы, входящих в неё подсистем, их взаимодействия между собой и даёт возможность одновременного рассмотрения и оценки нескольких альтернативных вариантов проектных решений. Последнее обстоятельство повышает достоверность и качество окончательно выбранного варианта. Основными функциями логистической организации и управления производственной системой и входящими в неё подсистемами являются координация и управление материальными и информационными потоками с целью повышения общего уровня организации производственной логистической системы, календарной синхронизации работы цехов, производственных участков и отдельных рабочих мест в потоке и всего потока в целом, при обеспечении непрерывности хода производственного процесса и при любом уровне загрузки имеющихся производственных мощностей.

Список литературы

[1] Кулик Ю.Г., Бурмистров Е.Г. Логистика процессов сборочно-сварочного производства в судостроении: Учебное пособие / Ю.Г.Кулик, Е.Г. Бурмистров. – Н. Новгород: Издательство ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2004.–112 с.
[2] Кулик Ю.Г. Технология судостроения и судоремонта. Учебник для институтов водного транспорта / Ю.Г. Кулик, Ю.В. Сумеркин. – М.: Транспорт, 1988. – 352 с.
[3] Варжапетян А.Г. Имитационное моделирование на GPSS/H: учебное пособие /А.Г. Варжапетян. – ГУАП. – СПб., 2007. – 384 с.
[4] Логистика: учебное пособие /под ред. Б.А. Аникина. – М.:ИНФРА-М, 1999. – 327 с.
[5] Имитационное моделирование. Теория и практика: Материалы IV-й всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. – ИММОД. – 2009.
[6] Имитационное моделирование экономических процесов: учебное пособие для слушателей программы eMB/ Н.Н. Лычкина. – Академия АйТи. – 2005.

DEVELOPING GENERAL WORK SCHEDULE AS WELL AS PRODUCTION PROCESS SCHEDULES FOR VESSEL CONSTRUCTION ALLOWING FOR PRODUCTION LOGISTICS LAWS

D.A. Galochkin, E.G. Burmistrov

General approaches employing production logistics laws are considered when developing general work schedule for vessel construction as well as production process schedules for production preparation. Major development stages and their description are given of general work schedule and production process schedules using imitation modeling methods in preparing production for constructing vessels.

УДК 629.5.06:[628.3:502.3]

***Н.Л. Горин**, аспирант, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
***С.В. Васькин**, доцент, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
***В.Л. Этин**, профессор**,** ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603600, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АЭРАЦИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ УВЕЛИЧЕНИЕ СРОКОВ ХРАНЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД В СУДОВЫХ СБОРНЫХ ЦИСТЕРНАХ

Статья посвящена исследованиям по обоснованию повышения экологической безопасности судов речного флота путем обеспечения необходимой автономности плавания по хозяйственно-бытовым сточным водам с помощью системы аэрации сборных цистерн и разработки методики определения основных характеристик этой системы.

В «Концепции развития внутреннего водного транспорта» (распоряжение Правительства Российской Федерации от 3 июля 2003 г. № 909-р) отмечается, что водный транспорт является наиболее экологически безопасным видом транспорта. Поэтому «…обеспечение экологической безопасности на внутренних водных путях (ВВП) должно оставаться одним из приоритетов государственной политики в области управления внутренним водным транспортом (ВВТ)».

Очевидно, что уровень экологической безопасности ВВТ главным образом зависит от экологической безопасности флота, работающего на ВВП.

Анализ этой проблемы показывает, что наибольшие трудности возникают при решении задач предотвращения загрязнения ВВП хозяйственно-бытовыми сточными водами (ХБСВ) с судов. Это связано с тем, что органами Роспотребнадзора РФ запрещается сброс неочищенных ХБСВ в водные объекты и одновременно ограничивается срок их хранения на борту судна.

Соответственно возникает необходимость частого выполнения судами операций по сдаче ХБСВ на внесудовые приемные устройства (ПУ). При этом плотность расстановки ПУ на реках РФ в 10…20 раз ниже, чем, например, на реках Западной Европы. Недостаточное количество ПУ и ограниченная автономность плавания судов по условиям хранения ХБСВ в некоторых случаях вынуждают капитанов сбрасывать их в водоем, создавая опасность возникновения и распространения различных заболеваний среди населения, проживающего в прибрежной зоне.

Не решает проблемы и установка на борту судов систем и устройств для обезвреживания ХБСВ. Это связано с тем, что органами Роспотребнадзора РФ в соответствии с СанПиН 2.1.5.980–00 запрещается сброс очищенных ХБСВ в зонах санитарной охраны поверхностных источников водоснабжения населения.

С учетом плотности расположения этих зон на судоходных реках России, количество и протяженность участков ВВП, на которых допускается сброс очищенных ХБСВ, существенно сокращается. Кроме того, наличие ограничений на сброс любых стоков на акваториях особо охраняемых водных объектов, имеющих природоохранное, научное, культурное, эстетическое, рекреационное и оздоровительное значение, вообще делают этот способ обеспечения экологической безопасности экономически мало приемлемым для подавляющего большинства транспортных судов речного флота. Исключение составляют только крупные туристические суда, достаточно часто посещающие крупные порты, оборудованные ПУ.

Таким образом, в настоящее время единственным приемлемым для большинства речных судов способом обеспечения экологической безопасности по ХБСВ является хранение неочищенных сточных вод в соответствующих судовых цистернах с после-

дующей сдачей их на внесудовые ПУ. Этот способ рекомендуется «Техническим регламентом о безопасности объектов внутреннего водного транспорта» (постановление Правительства РФ от 12 августа 2010 г. № 623).

Следовательно, для дальнейшего совершенствования экологической безопасности по ХБСВ судов речного флота необходимо либо в короткие сроки увеличить в несколько раз количество ПУ на реках РФ, что невозможно, либо путем использования новых технических решений по увеличению срока хранения ХБСВ на судне обеспечить необходимую автономность плавания судов без значительного увеличения сети ПУ. В результате будет достигнут необходимый экологический эффект, а возникшие в этом случае издержки на создание и внедрение новой техники можно компенсировать сокращением времени технологических простоев судна.

Известно, что ограничение сроков хранения ХБСВ на судах обусловлено возникновением процесса загнивания сточных вод в условиях недостатка кислорода. Приемлемым и достаточно широко применяемым способом обогащения сточных вод кислородом при их очистке на береговых сооружениях является аэрация сточных вод воздухом. Для борьбы с загниванием сточных вод на судах, в отмененных в настоящее время «Наставлениях по предотвращению загрязнения внутренних водных путей при эксплуатации судов» (РД 152–011–00), также содержались рекомендации о возможности применения аэрации для этих целей. Однако опубликованных научных или методических работ по использованию аэрации для продления срока хранения ХБСВ на борту речных судов автором обнаружено не было.

Анализ большого количества работ, связанных с данной тематикой, показал, что они, в основном, посвящены вопросам предотвращения загрязнения водной среды судами при помощи специального природоохранного оборудования, методам его проектирования и особенностям эксплуатации. Проблема долговременного накопления и хранения сточных вод в ограниченном объеме на борту судна авторами не рассматривалась.

Увеличения сроков хранения сточных вод можно добиться повышением стойкости их к загниванию, что достигается уменьшением количества находящихся в воде загрязняющих органических веществ или повышением содержания в воде растворенного кислорода.

При этом необходимо выбрать такой способ обработки сточных вод, который не предусматривал бы использования дорогостоящей аппаратуры, материалов и реагентов, и мог быть легко реализован на судах без существенной модернизации судового оборудования.

Анализ возможности обеспечения необходимой стойкости сточных вод показал, что единственным технически и практически приемлемым способом увеличения сроков их хранения на судне является аэрация этих отходов непосредственно в сборных цистернах. Аэрация стоков будет способствовать протеканию в них различных процессов, препятствующих загниванию (химическое и биохимическое окисление).

Поскольку образование сточных вод неразрывно связано с водопотреблением, были проанализированы количество и режимы потребления воды на судах.

Вопрос потребления воды на судах внутреннего и смешанного плавания нашел отражение как в научных трудах, так и в ряде руководящих документов. При этом в разных источниках подход к этому вопросу трактуется по-разному.

В некоторых документах приводятся средние нормы водопотребления, зависящие от уровня комфортности судна. Использование таких данных позволяет определить среднесуточное количество сточных вод, поступающих в сборную цистерну, но не дает представления о режиме их поступления. В других работах рекомендуется составление баланса почасового расхода воды потребителями с учетом реального количества и типа судовой водоразборной арматуры, распорядка дня на судне, нормализованных секундных расходов через арматуру и коэффициентов одновременности, учитывающих часовую загрузку и число одновременно включенных потребителей.

Кроме того, проведенные различными авторами исследования показали, что режим образования сточных вод на судах существенно отличается от режима их образования в береговых условиях, характеризуясь наличием ярко выраженных пиков.

Сравнительный анализ источников, посвященных вопросам водопотребления на судах речного флота, позволил сделать следующие выводы:

– количество воды, потребляемой на судне, является случайной величиной, зависящей от комфортабельности судна, погодных условий, количества и типа установленной на судне водоразборной арматуры и других факторов;

– расчет водопотребления (водоотведения) необходимо производить для каждого конкретного проекта судна с учетом типа, количества и режима работы потребителей;

– режим водопотребления, а значит и образования сточных вод на судах, носит периодический характер с выраженными пиковыми расходами, что объясняется распорядком дня на судне. При этом пиковые расходы в несколько раз превышают среднечасовые.

Анализ состава судовых ХБСВ показал, что состав судовых сточных вод практически идентичен составу коммунальных (городских) стоков, не смешанных со стоками промышленных предприятий, и не является постоянным. Поэтому для исследования преобразования состава ХБСВ в процессе их аэрации был определен возможный интервал варьирования показателей, характеризующих их первоначальное загрязнение.

На основании анализа исследований, посвященных вопросам изучения состава загрязнений судовых и коммунальных (городских) сточных вод, можно сделать следующие выводы:

– состав судовых ХБСВ может существенно изменяться в течение суток. Наиболее концентрированные стоки образуются в период с 10 до 14 часов, наименее концентрированные – в период с 20 до 6 часов;

– содержание органических примесей в судовых ХБСВ, характеризуемое показателями БПК5, БПКП и ХПК, зависит от водопотребления на судне и может достигать значений 1000, 1450 и 1650 мг О2/л соответственно;

– температура судовых сточных вод находится в интервале 10…30˚С; наиболее вероятное значение этого параметра составляет 20…22˚С.

Выполненный аналитический обзор существующих конструкций аэраторов, применяемых в других отраслях техники, позволил сделать вывод о предпочтительности использования в судовых условиях пневматических аэраторов с системой распределения воздуха при помощи перфорированных труб.

При аэрации сточных вод в судовых цистернах будут протекать процессы окисления содержащихся в воде примесей, что способствует повышению стойкости ХБСВ к загниванию. Известно, что на константу скорости этих процессов оказывают существенное влияние кроме интенсивности аэрации температура и состав сточных вод. Однако как было показано выше, состав судовых ХБСВ практически не отличается от состава береговых сточных вод, а влияние температуры на процесс окисления ХБСВ достаточно подробно описано в литературе по очистке бытовых городских сточных вод и не требует дополнительных исследований.

Для установления влияния интенсивности аэрации на константу скорости окисления загрязнений были проведены экспериментальные исследования на специальном стенде. Обработка результатов эксперимента показала:

– скорость снижения БПК при аэрации ХБСВ пропорциональна величине БПК, характеризующей содержание в воде органических примесей.

– влияние интенсивности аэрации на константу скорости снижения БПК сточных вод при обработке воздухом может быть описана уравнением вида

$$k = k_0 + A\left(1 - \exp\left\{-B \cdot I\right\}\right), \qquad (1)$$

где k_0 = 0,0082 – константа скорости окисления при отсутствии аэрации, $ч^{-1}$;
A и *B* – экспериментальные коэффициенты, равные соответственно 0,0213 $ч^{-1}$ и 2,1687 ч/м;
I – интенсивность аэрации сточных вод, $м^3/(м^2 \cdot ч)$.

С учетом известного из литературы выражения:

$$k_T = k_{20} \cdot 1{,}047^{t-20}, \tag{2}$$

где k_{20} – значение константы *k* при температуре сточных вод равной 20˚ С;
t – фактическая температура сточных вод, ˚С.

Зависимость константы скорости окисления от интенсивности аэрации и температуры ХБСВ можно описать выражением:

$$k = \left[k_0 + A\left(1 - \exp\left\{-B \cdot I\right\}\right)\right] \cdot 1{,}047^{t-20}. \tag{3}$$

Для предотвращения загнивания необходимо создать условия, при которых стойкость ХБСВ (т.е. отношение содержания в ней кислорода к количеству органических примесей, выраженному в $БПК_П$) будет равна величине, которая обеспечивает требуемую продолжительность хранения [τ]. Зная стойкость, потребную для достижения безопасного срока хранения ХБСВ, можно определить соответствующее значение константы скорости окисления, обеспечивающее необходимое снижение БПК в течение времени [τ].

Поскольку при непрерывном поступлении в сборную цистерну свежих порций сточных вод величина константы *k* непрерывно и случайно меняется во времени, в период хранения ХБСВ можно говорить только о некоторой интенсивности аэрации, гарантирующей значение константы *k*, предотвращающей загнивание ХБСВ в цистерне при заданной температуре сточных вод.

Поэтому, используя результаты экспериментальных исследований, в работе были получены формулы для определения интенсивности аэрации *I* в зависимости от срока хранения ХБСВ при различной температуре в сборной цистерне вида

$$I = a\left(1 - e^{-b[\tau]}\right) - c, \tag{4}$$

где [τ] – расчетный срок хранения ХБСВ в сборной цистерне, сут;
a, *b* и *c* – опытные коэффициенты.

Кривые изменения интенсивности аэрации в зависимости от сроков хранения ХБСВ и температуры приведены на рис. 1.

Поскольку полученные расчетные значения интенсивности аэрации не учитывают особенностей образования судовых ХБСВ, характеризующихся значительной неравномерностью поступления их в сборную цистерну, изменения температуры воды в результате теплообмена с внешней средой, было разработано соответствующее математическое описание, включающее в себя уравнения материального, теплового и энергетического балансов.

С точки зрения аппаратов химической технологии судовая цистерна сточных вод представляет собой непроточный реактор периодического действия. При рассмотрении структуры потока жидкости в судовой цистерне был сделан вывод о том, что она с учетом аэрации может быть описана моделью идеального смешения. Материальный баланс судовой цистерны сточных вод с аэрацией может быть описан системой известных из литературы уравнений для непроточных реакторов периодического действия:

$$\begin{cases} V(\tau) = V_{\min} + Q(\tau)d\tau \\ \dfrac{dC}{d\tau} = \dfrac{Q(\tau)\left[C_0(\tau) - C\right]}{V(\tau)} - \bar{k}C, \end{cases} \tag{5}$$

где $V_{\min}$ – минимальный (невыбираемый) объем воды в цистерне сточных вод, м^3;
$V(\tau)$ – текущий объем воды в цистерне сточных вод, м^3;
$Q(\tau)$ – функция, описывающая изменение во времени потребления воды на судне, м^3/ч;
$C_0(\tau)$ – функция, описывающая изменение во времени БПК хозяйственно-бытовой сточной воды, г/м^3;
C – текущее БПК сточной воды в цистерне, г/м^3.

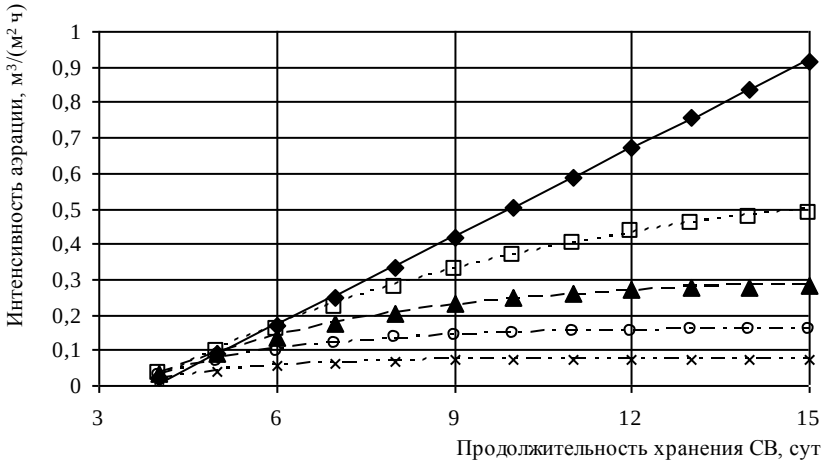


Рис. 2. Зависимости допустимой продолжительности хранения сточных вод от интенсивности аэрации и температуры стоков:
◆ – t = 10˚С; □ – t = 15˚С; ▲ – t = 20˚С; ○ – t=25˚С; × – t = 30˚С

Анализ графиков суточного водопотребления на большинстве судов речного флота, выполненных различными исследователями, показал, что уравнение $Q(\tau)$, характеризующее количество образующихся сточных вод, может быть достаточно близко описано периодической функцией вида

$$Q(\tau) = \frac{k_H Q_{cp} - (1/k_H)Q_{cp}}{2}\sin\left(\frac{K1\pi\tau}{2} - K2\right) + Q_{cp}, \tag{6}$$

где k_H – коэффициент неравномерности водопотребления на судне, принимаемый в соответствии с руководящими документами или определяемый расчетом;
Q_{cp} – среднечасовой расход воды, определяемый нормативно или расчетным путем, м^3/ч;
τ – время суток, ч;
$K1$ и $K2$ – коэффициенты, учитывающие смещение экстремумов водопотребления относительно времени смены вахт.

Зависимость БПК ХБСВ от времени суток была получена на основании исследований, проведенных ранее В.И. Косовским. Обработка результатов этих исследований позволила установить, что функция $C_0(\tau)$ с коэффициентом корреляции равным 0,96 описывается степенным полиномом вида

$$C_0(\tau) = \frac{0{,}277}{Q_{ср}}\left(a_0 + \sum_{i=1}^{6} a_i \tau^i\right), \qquad (7)$$

где 0,277 л/(чел·сут) – среднее удельное водопотребление на судне во время проведения исследований.

С целью изучения влияния на температуру сточных вод в сборной цистерне теплообмена с окружающей средой было составлено уравнение теплового баланса, имеющего следующий вид:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{V(\tau)}\left[Q(\tau)(t_0 - t) - \frac{k_T \sum F}{\rho_ж c}(t - t_н)\right], \qquad (8)$$

где t – текущая температура стоков в цистерне, ˚С;
t_0 – температура воды, поступающей в цистерну, ˚С;
$t_н$ – температура внешней среды, ˚С;
$\rho_ж$ – плотность сточной жидкости, кг/м^3;
c – теплоемкость жидкости, Дж/(кг · ˚С);
$\sum F$ – суммарная площадь ограждения сборной цистерны, м^2;
k_T – коэффициент теплообмена, Вт/(м^2 · С).

Таким образом, выражение (8) позволяет учитывать влияние теплообменных процессов на величину константы скорости окисления, а подстановка формул (3), (6) и (7) в систему (5) позволяет получить решение уравнения материального баланса, определяя текущую концентрацию загрязнений в судовой цистерне для любого момента времени τ.

Поскольку параметром, управляющим состоянием ХБСВ в судовой цистерне, является интенсивность аэрации, определяемая количеством подаваемого в цистерну воздуха, была установлена ее зависимость от давления в системе аэрации p_1, основных конструктивных характеристик системы, а также факторов внешней среды:

$$p_1 = p_2 + \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta\right)\frac{\rho w^2}{2}, \qquad (9)$$

где $p_2 = \rho_ж g h_ж + \Delta p_o$ – давление перед выпускным отверстием, Па;
$\rho_ж$ – плотность сточной воды, кг/м^3;
$h_ж$ – высота столба воды над выпускным отверстием, м;
$\Delta p_o = \rho w_o^2/2$ – потери давления в выпускном отверстии, Па;
λ – коэффициент трения;
l – длина трубопровода системы аэрации, м;
d – диаметр соответствующего трубопровода, м;
ρ – плотность воздуха, кг/м^3;
w – скорость движения воздуха в трубопроводе, м/с.

Основным фактором внешней среды, влияющим на энергетический баланс системы, является температура окружающего воздуха. Однако в реальном диапазоне изменения температур, ее влияние на плотность и вязкость воздуха не превышает 2% и в практических расчетах может не учитываться.

Производительность системы аэрации, м^3/ч, рассчитывается по формуле

$$L_a = I \cdot F, \qquad (10)$$

При известной производительности давление в системе аэрации будет определяться по выражению

$$p_1 = 8\rho\left(\frac{L_a}{\mu\pi d_o^2 N_o}\right)^2 + p_{ж} + \left(\lambda\frac{l}{d} + \sum\varsigma\right)\frac{\rho w^2}{2}, \qquad (11)$$

где μ – коэффициент расхода воздуха через отверстия в аэрационных трубах;
d_o – диаметр отверстия в аэрационных трубах, м;
N_o – количество отверстий.

С помощью математического описания были выполнены исследования процесса хранения ХБСВ в судовой сборной цистерне с аэрацией. Анализ результатов проведенных исследований позволил установить следующее:

1. Коэффициент суточной неравномерности водопотребления на судне также практически не оказывает влияния на процесс хранения сточных вод. Проведенные исследования показали, что изменение содержания примесей в воде при коэффициентах неравномерности равных 1,8 и 7,0 несколько отличается лишь в первые сутки накопления стоков.

2. Температура окружающей среды в рассматриваемом интервале ее изменения практически не влияет на температуру сточных вод в цистерне и, соответственно, на величину константы процесса окисления k.

3. Основное снижение содержания примесей в цистерне происходит в ночное время, т.е. в период, когда водопотребление отсутствует или минимально.

Результаты исследований, выполненных на основе математического описания процесса хранения ХБСВ в судовой цистерне с аэрацией, позволили создать математическую модель судовой системы аэрации ХБСВ, включающую следующие зависимости:

$$\begin{cases} I = a\left(1 - e^{-b[\tau]}\right) - c \\ L_a = I \cdot F \\ p_1 = 8\rho\left(\dfrac{L_a}{\mu\pi d_o^2 N_o}\right)^2 + p_{ж} + \left(\lambda\dfrac{l}{d} + \sum\varsigma\right)\dfrac{\rho w^2}{2} \end{cases} \qquad (12)$$

Полученная математическая модель может быть применима в диапазоне изменения удельного водопотребления на судне от 0,1 до 0,3 м^3/(чел·сут); концентраций примесей в сточных водах, определяемых показателем БПК$_П$, от 100 до 1000 мг/л, изменения температуры сточных вод от 10 до 30˚С и интенсивности аэрации – от 0 до 1,2 м^3/(м^2·ч).

Разработанная математическая модель позволила создать методику определения основных характеристик судовой системы аэрациеии, обеспечивающей увеличение автономности плавания речных судов. К этим характеристикам относятся:

– интенсивность аэрации сточных вод во время эксплуатации судна, м^3/(м^2 ·ч);
– диаметры трубопроводов системы, d , м;
– производительность системы аэрации L_a, м^3/ч;
– давление в системе аэрации p_1, Па;
– конструкция аэратора.

Для использования методики необходимы следующие исходные данные:

– размеры (l×b×h, м) и расположение цистерн сточных вод на судне;
– температура сточных вод, ˚С;
– принципиальная схема судовой системы сжатого воздуха;
– требуемая автономность плавания судна по ХБСВ [τ], сут.

С помощью описанной методики по заданию ОАО «Порт Коломна» были опреде-

лены основные характеристики системы аэрации сточных вод для теплохода класса «М 3,0А». При количестве людей на борту судна 14 человек, размерах сборной цистерны сточных вод 3,73×1,75×1,89 м, средней расчетной температуре сточных вод 20˚ С и заданному сроку хранения сточных вод 12 суток получены следующие основные характеристики системы аэрации:

– интенсивность аэрации – 0,276 $м^3/(м^2 \cdot ч)$;

– расход воздуха на аэрацию – 1,8 $м^3/ч$;

– давление воздуха в системе аэрации – 19 кПа;

– тип аэратора – пневматический из перфорированных труб.

С учетом полученных характеристик были рассчитаны стоимость оборудования, материалов, изготовления и монтажа системы аэрации сточных вод, которые составили 50 тыс. рублей. Предполагаемый экономический эффект – 65 тыс. рублей/год, срок окупаемости – 1 год.

Таким образом, в результате выполнения исследований был научно обоснован способ повышения экологической безопасности судов речного флота путем обеспечения необходимой автономности плавания по сточным водам с помощью системы аэрации сборных цистерн и разработана методика определения основных характеристик этой системы.

Эта система позволяет увеличить автономность плавания речных судов по ХБСВ более чем в 2 раза, полностью исключив сбросы сточных вод в водоемы, и тем самым получить существенный экологический эффект. Ежегодный экономический эффект от внедрения систем аэрации на судах речного флота по ориентировочным оценкам может составить до 50 млн. рублей.

ENGINEERING DESIGN OF SYSTEM OF THE AERATION PROVIDING INCREASE IN PERIODS OF STORAGE OF SEWAGE IN SHIP MODULAR TANKS

N.L. Gorin, S.V. Vas'kin, V.L. Etin

Article is devoted to researches on justification of increase of ecological safety of vessels of river fleet by ensuring necessary autonomy of swimming on economic and household sewage by means of system of aeration of modular tanks and development engineering of a technique of definition of the main characteristics of this system.

УДК 629.12.002 – 52

С.В. Давыдова, *к.т.н., доц. ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ И ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ ОБЩЕГО ВИДА

Анализируются проявление общих тенденций в автоматизированном проектировании общего вида судов и в частности формирования архитектурно-компоновочных решений. Сформулирована обобщенная задача автоматизированного формирования общего вида судна с учетом современного опыта проектирования и состояния технического и программного обеспечения.

Для современной ситуации в судостроении характерно проявление общих тенденций падения цен на проектирование и постройку судов в результате усиления конкуренции предприятий из регионов с дешевой рабочей силой. В развитие судостроительной отрасли прослеживаются процессы глобального укрупнения предприятий, создание международных объединений и разработка совместных транс корпоративных проектов. Вместе с тем, судостроительная продукция является наукоемкой и технологически насыщенной. Необходимость проработки принципиальных конструкторских решений обусловливает разработку расчетно-логической системы проектирования судов. Целесообразно так же представлять процесс проектирования в виде последовательности соответствующих этапов. Такой подход позволяет решать для каждого этапа конкретные проблемы при достаточно четких формулировках целей, задач и способов их решения. Причем для каждого этапа могут быть выполнены требования по согласованию входной и выходной информации. Наряду с этим модель соответствующего этапа позволяет вырабатывать именно ту информацию, которая обеспечивает заданную глубину исследований в соответствии с объемом и характером входной информации, и поэтому в большей степени отвечает интересам проектных исследований.

Необходимость обеспечения достоверности принимаемых проектных решений предполагает не только формирования архитектурно-компоновочных решений, но и использования информации об этих решениях как при проведении задач оценки эффективности, так и для уточнения принятых проектных решений. Это требует разработки экспертной подсистемы формирования архитектурного облика судна и развитой подсистемы геометрического моделирования, ориентированной преимущественно не на изготовление чертежей, а на обеспечение судостроительных расчетов.

Автоматизация процесса исследования технической реализуемости компоновочного варианта судна, невозможна без обеспечения автоматизированной взаимосвязи между отдельными элементами, модулями и подсистемами автоматизированной системы, в частности, между аналитическими вычислениями, экспертной компонентой и подсистемой геометрического моделирования и графического отображения исследуемого варианта судна. И как следствие без оптимизации технико-экономических характеристик судна по выбранному проектантом критерию.

Этап проектирования является одним из наиболее важных этапов, включающий автоматизированное формирование общего вида, и объемной геометрической модели судна, которая играет базовую роль для проведения инженерного анализа.

В большинстве современных автоматизированных судостроительных систем принято для создания объемной модели судна, размещения типовых компонентов общего расположения, таких как блоки кают, коридоров, лестничных маршей, использовать методы трехмерного твердотельного, поверхностного моделирования или сочетание этих методов. Широко используется унификация и каталогизация типовых способов и элементов общего расположения с возможностью присвоения им физических или параметрических свойств.

На сегодняшний день все существующее программное обеспечение автоматизированного конструирования принято классифицировать по функциональной полноте. По этому признаку оно делится условно на три уровня.

К нижнему уровню относятся программы, реализующие 2D модели в виде чертежей и эскизов на базе AutoCAD.

На среднем – располагаются программные комплексы, которые позволяют создать 3-х мерную геометрическую модель методом твердотельного моделирования. К числу этих программных комплексов можно отнести: К3-SHIP, КОМПАС 5 (Аскон), AutoCAD, NUPAS-CADMATIC, ПЛАТЕР, ShipModel , NAPA , САПС.

Программные системы сквозного проектирования и производства расположены на верхнем уровне. Среди них можно выделить: FORAN, CATIA5 TRIBON, AutoSHIP.

Исходя из современного состояния в техническом и программном обеспечении процесса проектирования в составе базового программного обеспечения для разработки общего вида судна наиболее предпочтителен AutoCAD, в частности из-за встроенного в AutoCAD компилятора языка Visual Lisp, с поддержкой языка создания диалоговых окон DCL, а также устройству объектной модели самого AutoCAD, поддерживающей технологию ActiveX. Все эти возможности предоставляются в любой стандартной версии программы и не требуют установки дополнительного программного обеспечения. Расширение Auto Lisp содержит специальные команды для работы непосредственно с объектами программы, выстроенными по внутренней иерархии в соответствии с технологией ActiveX, от объекта самой программы (ACAD object) и активного рабочего пространства открытого чертежа (ActiveDocument object) до объектов самих примитивов, таких как линия (AcadLine) , их свойствами и методами. Программные комплексы системы могут размещаться на персональных компьютерах типа Pentium под ОС Windows.

Обобщенная задача автоматизированного формирования общего вида судна с учетом современного опыта проектирования и состояния технического и программного обеспечении может быть сформулирована следующим образом.

Необходимо выполнить размещение необходимых помещений в корпусе на палубе и надстройке судна, обеспечивающее заданным техническим характеристикам и требованиям нормативных документов.

Заданными характеристиками являются элементы технического задания на проектирование, а именно конструктивный тип судна, грузовместимость, специальные требования по размещению груза на судне.

Выбор окончательного варианта может быть сделан на основании оценки критерия эффективности судна для различных вариантов общего расположения.

Автоматизированное формирование общего вида грузового судна может выполняться в соответствии со следующими этапами:

1. Этап определения главных элементов судна позволяет решать следующие задачи:

– определение масса-габаритных характеристик полезной нагрузки главной энергетической установки, вспомогательных механизмов, общесудовых систем и устройств;

– расчет запасов топлива, воды и масла; массы провизии, снабжения и имущества;

– расчет основных разделов нагрузки масс судна;

– определение главных размерений судна.

2. Этап формирования общего расположения включает:

1) Автоматизацию разработки поверхности корпуса судна;

2) Формирование основных архитектурных элементов корпуса:

– выделение основных отсеков в корпусе судна, расстановка главных поперечных переборок;

– определение положения палуб и платформ, второго дна в корпусе судна;

– размещение судового оборудования и механизмов в корпусе;

– оценки полученного варианта планировки корпуса судна.

3) Формирование архитектурно компоновочных решений надстройки:

– разработка компоновок надстроек надстроек и помещений;

– оптимизация параметров надстройки;

– оптимальной компоновки надстройки.

3. Модуль поверочных расчетов:

– расчет посадки и начальной остойчивости;

– ходкости;

– расчет нагрузки масс;

– расчет мощности ЭУ и выбор главных двигателей;

– расчет элементов гребного винта;

– остойчивости на больших углах крена.

Для выполнения автоматизированного проектирования общего расположения судна необходимо сформировать следующие базы данных:

– База судовых корпусов для генерация теоретической поверхности.
– База топологических схем компоновок судовых корпусов.
– База топологических схем надстроек.
– База типовых судовых помещений.
– Баз данных деталей корпусных конструкций.
– База используемого оборудования.

Автоматизированная система должна позволять выполнять обработку всех элементов базы данных.

Список литературы

[1] Гайкович А.И. Построение Сапр судна как системы обработки знаний фреймовой структуры // «Программные продукты и системы» № 4, 1993 г.
[2] Гайкович А.И. Комплексная система автоматизированного исследовательского проектирования надводных кораблей// «Программные продукты и системы» № 4, 1996 г.
[3] Суслов А.Н., Одегова О.В., Головко Е.А. Опыт работы со стандартом STEP // Судостроение 2'2002 (741) март-апрель.
[4] Милавин С.А., Посадов Д.А. Проектирование судов в реалиях России // Судостроение 6'2010 (793) ноябрь-декабрь.
[5] Бубнов А. САПР в судостроении// «САПР и графика», №5 2000 г.
[6] Захаров И.Г. Методы формирования архитектурно-компоновочных решений корабля при исследовательском проектировании. – С.-Петербург: ВМорА, 1991 г.

ANALYSIS OF MODERN TENDENCIES AND SUMMING-UP OF EXPERIENCE IN THE AREA OF AUTOMATED FORMATION OF A GENERAL KIND

S.V. Davydova

The manifestation of general tendencies in automated design of general purpose vessels is analyzed and in particular the tendency in architecture and lay-out solutions. A generalization has been made of the task of automated formation of general purpose vessel allowing for the modern design experience and the state of technology and software availability.

УДК 629.122.6

Е.И. Денисова, *аспирант, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЕЧНЫХ КРУИЗНЫХ СУДОВ

В данной статье приведен краткий обзор состояния речных пассажирских теплоходов, эксплуатируемых на реках РФ, и рассмотрены перспективы развития речных круизных судов.

Спрос на услуги речного пассажирского флота существует и постоянно растёт с увеличением платёжеспособности населения РФ. В начале и средине 90-х годов XX века судоходные компании, в основном, получали доходы от организации круизов по рекам России для иностранных туристов, и уже тогда возникали вопросы о необ-

ходимости обновления флота, так как большинство речных пассажирских судов были построены в 50–80-х годах XX века и эксплуатировались в совершенно иных социально-экономических условиях и при другом понимании комфортного пребывания туриста на борту теплохода. С течением времени спрос со стороны иностранных туристов стал постепенно снижаться в связи с высокой стоимостью круизов и недостаточным уровнем комфорта, вызванным в первую очередь сильнейшим физическим и моральным износом флота. Но в тоже время стал расти спрос со стороны российских туристов, изначально менее требовательных к комфорту. Однако с ростом платёжеспособности стали повышаться требования российских туристов к условиям обитания на борту судна [1].

Значительная часть судов, эксплуатирующихся в данный момент, не соответствуют сегодняшним требованиям пассажиров с одной стороны, а с другой стороны эти же суда после модернизации становятся все более недоступными широким слоям населения в связи с новыми технико-экономическими параметрами.

Какими же должны быть новые речные круизные суда, чтобы обеспечивать достаточный уровень комфорта для пассажиров и иметь оптимальный уровень затрат на содержание, что в дальнейшем позволит избежать завышенной стоимости круизного тура не сопоставимой с уровнем комфорта судна? Данное обстоятельство становится особенно актуальным в связи с тем, что помимо речных круизных маршрутов, российские Судовладельцы и туроператоры активно осваивают традиционные линии работы морского пассажирского флота.

Перед судоходными компаниями остро встаёт проблема обновления флота для удовлетворения запросов и привлечения большего числа пассажиров, но, в связи с высокими затратами и недостаточностью финансовых средств, строительство нового флота в настоящее время проблематично. Дефицит финансовых ресурсов в первую очередь вызван недостаточным развитием рынка долгосрочного кредитования и лизинга в нашей стране. Следовательно, единственным способом поддержания круизного пассажирского флота в работоспособном и пригодном для организации круизов состоянии является модернизация этих судов.

Модернизация направлена на повышение уровня комфортабельности судов. Хотя она и значительно дешевле, чем новое судостроение, но всё равно требует привлечения значительных финансовых ресурсов в форме капитальных вложений со стороны Судовладельцев. Модернизация круизного судна предусматривается в большом и малом объеме. Большая модернизация предусматривает капитальный ремонт всего судна и фактически сравнима по материальным и трудозатратам с новым судостроением. Как уже отмечалось выше, отечественные судоходные компании не обладают достаточным количеством свободных финансовых ресурсов и поэтому чаще ограничиваются малой, поэтапной модернизацией. Малая модернизация проводится в межнавигационный период и предусматривает обычно переоборудование какой-либо части судна, например, блока кают, палубы, общественных или иных помещений. Данные работы предусматривают меньшее единовременное вложение средств, чем большая модернизация.

Еще одним важным аспектом данной проблемы является вступление Российской Федерации во Всемирную Торговую Организацию и следующее за этим открытие внутренних водных путей для судов под иностранным флагом, что неминуемо приведёт к обострению конкуренции в сфере речных пассажирских перевозок и может закончиться вытеснением и поглощением российских судоходных компаний их западными конкурентами, которые обладают большим опытом в данной сфере и финансовыми ресурсами.

Исследования состояния пассажирского флота показали, что средний возраст речных пассажирских судов, эксплуатируемых на реках РФ, составляет 36,2 года. Этот возрастной показатель свидетельствует о критическом состоянии пассажирского флота, так как он значительно превышает нормативные сроки службы судов. Сравнение с

европейским пассажирским флотом приводит к неутешительным выводам, так как основной костяк этого флота составляют суда возрастом до 10 лет, кроме того в последние годы в Европе наблюдаются значительные темпы строительства нового пассажирского флота. Также сравнение российского и европейского пассажирских флотов показывает значительно меньшую экономическую эффективность отечественных судов по сравнению с европейскими. Это объясняется неэффективным использованием площадей на российских речных круизных судах (см. табл. 1). При меньших размерах (вследствие меньших гарантированных габаритов судового хода на европейских реках), западноевропейские суда обладают практически такой же пассажировместимостью, что и российские. На европейских судах значительно меньшую площадь занимают открытые палубы (7%), а большую площадь занимают каюты для пассажиров (33%). Тогда как на отечественных судах пассажирские каюты занимают лишь 19% площадей судна, а открытые палубы 30% от площади речного пассажирского теплохода. Следовательно, европейские суда приносят больший доход своим судовладельцам [2].

Самым перспективным направлением развития пассажирского флота представляется развитие судов класса «река-море». Данные суда смогут приносить больший доход судовладельцам вследствие возможности совершения смешанных круизов по речным и морским путям, а главное решиться проблема сезонности работы речного флота, так как в межнавигационный период данные суда смогут работать на морских круизных линиях. В настоящее время в РФ имеется единственное пассажирское судно смешанного «река-море» плавания: теплоход «Казань», построенный в Италии и эксплуатировавшийся ранее в Средиземном море. Сейчас этот теплоход совершает круизы по рекам России, по маршруту Вена – Москва и используется в представительских целях.

Таблица 1

Показатели уровня комфортабельности пассажирских судов

№ п/п	Параметр	Номер проекта судна				
		Q040	Q056	301	302	92-016
Характеристики судна						
1	Длина габаритная, м	110,09	115,66	125,00	129,15	135,75
2	Ширина габаритная, м	14,5	16,5	16,7	16,7	16,8
3	Осадка судна, м	2,2	2,8	2,76	2,9	2,9
4	Высота борта, м	4,298	4,8	4,5	4,5	5,05
5	Высота борта от ОП до несъемных частей, м	15,1	16,0	15,9	13,2	16,1
6	Мощность ДВС, л.с.	2x900	2x900	3x1000	3x1000	3x1000
7	Класс судна	‡ М2,0А	‡ М3,0А	‡ О2,0А	‡ М3,0 (лед 30)	‡ О2,0А
8	Пассажировместимость, чел.	216	250	334	332	372
9	Количество членов экипажа, чел.	66	76	84	98	88
10	Количество палуб	4	4	4	4	4
11	Место постройки	Австрия	Австрия	Германия	Германия	Словакия
Площади помещений						
12	Двухместная пассажирская каюта на средней палубе, м^2	9,7	9,9	10,3	10,3	9,9
13	Двухместная каюта для членов команды, м^2	7,5	7,9	7,9	7,9	7,0
14	Ресторан, м^2/количество мест	196,0/120	242,0/130	350,0/187	360,3/194	282/188
15	Бар, м^2/количество мест	42,0/39	36,0/16	46/35	199,3/93	42,0/38

№ п/п	Параметр	Номер проекта судна				
		Q040	Q056	301	302	92-016
16	Музыкальный салон, $м^2$/количество мест	74,0/55	222,0/162	94,5/70	73,5/70	81,2/29
17	Конференц-зал, $м^2$/количество мест	55,0/32	38,0/20	117,7/60	123,5/47	63,0/40
18	Кинозал, $м^2$/количество мест	63,0/40	99,0/86	111,0/174	123,5/47	144/198
19	Читальный зал, $м^2$/количество мест	39,0/28	36,0/17	38,0/22	38/28	38,0/24
20	Блок кают на главной палубе, $м^2$	414,0	374,0	428,0	442,0	444,4
21	Блок кают на средней палубе, $м^2$	454,5	546,5	512,3	639,2	697,0
22	Блок кают на шлюпочной палубе, $м^2$	378,0	100,8	353,4	460,6	545,0
23	Площадь открытой средней палубы, $м^2$	478,4	163,6	455,8	482,0	519,5
24	Площадь открытой шлюпочной палубы, $м^2$	355,1	234,2	580,6	537,5	439,5
25	Площадь открытой солнечной палубы, $м^2$	575,0	365,8	540,5	395,7	515,0
Оснащение двухместной пассажирской каюты						
26	Санузел	+	+	+	+	+
27	Душ	+	+	+	+	+
28	Кондиционер	+	+	+	+	+
29	Холодильник	-	-	-	+	-
30	Телевизор	-	-	-	-	-
31	Радио	+	+	+	+	+
Удобства на борту судна						
32	Солярий	+	+	+	+	+
33	Сауна	-	-	+	+	-
34	Медицинский пункт	+	+	+	+	+
35	Парикмахерская	-	-	+	-	+
36	Гладильная комната	+	+	+	+	+
37	Сувенирный киоск	+	+	+	+	+
38	Бассейн	-	+	-	-	-

Список литературы

[1] Соснин А.С. Речные круизы 40 лет назад/ А.С. Соснин // Газ. Флот и круизы. – 2006. №25. – С. 10

[2] Семин А.А. Речной круизный флот: перспективы и современность/ А.А. Семин // Газ. Флот и круизы. – 2006. №28. – С. 17

STATUS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF RIVER CRUISE VESSELS

E.I. Denisova

This article provides a brief overview of the status of river passenger vessels operated by the rivers of Russia, and the prospects of development of river cruise vessels.

УДК 629.12.061.014.72

В.В. Захарова, *аспирант, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
Е.Г. Бурмистров, *д. т. н., проф., ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТИПОВ БАЛЛАСТНЫХ СИСТЕМ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО И СМЕШАННОГО (РЕКА–МОРЕ) ПЛАВАНИЯ

Применение балласта на судах является необходимым для их эффективной эксплуатации. Однако, использование жидкого балласта влечёт за собой ряд негативных последствий: завышение энергоёмкости балластного оборудования, перерасход ГСМ, экологическое загрязнение водоёмов чужеродными микроорганизмами и др. традиционные методы решения этих проблем по экономическим причинам являются недостаточно эффективными. Более рациональным представляется внедрение в практику судостроения принципов безбалластного судна. Для разработки концепции такого судна в данной статье выполнен анализ современных и перспективных типов балластных систем судов внутреннего и смешанного «река-море» плавания.

Балластные системы появились на судах в середине XIX в., когда твёрдый балласт (песок, щебень, камни) стали заменять жидким – забортной водой. В начале XX в. балластные системы использовали также для приёма и удаления пресной воды, хранящейся в междудонных цистернах.

На современных судах балластные системы являются общесудовыми системами, предназначенными для приёма водного балласта, для перекачки и удаления его с судна с целью изменения осадки и остойчивости, выравнивания или создания искусственного крена и дифферента при выполнении погрузочно-разгрузочных работ, плавании во льдах и в аварийных ситуациях, а также в связи с расходованием запасов топлива и воды. Данные системы служат для придания судну необходимых мореходных и эксплуатационных качеств изменением осадки, крена и дифферента. Балластными системами, используемыми для изменения осадки, оборудуют суда смешанного плавания (река-море). Приём балласта (перед выходом в море) приводит к увеличению осадки, что в свою очередь повышает остойчивость судна, снижает ветровую нагрузку, улучшает управляемость. Балластировку применяют также в целях сохранения расчётной осадки, изменяющейся по мере расходования запасов топлива, и обеспечения работы движителя с максимальным к.п.д.

В группу балластных систем входят креновые и дифферентные системы. Креновые – служат для устранения или компенсации кренящих моментов, возникающих от несимметрично расположенных грузов относительно диаметральной плоскости судна (ДП). Эти системы характерны главным образом для специальных судов.

Дифферентными системами оборудуют грузовые и ледокольные суда. Дифферент в корму, который создаётся у грузовых судов при плавании порожнём, снижает устойчивость их на курсе и затрудняет управляемость. Нежелательный дифферент устраняют приёмом воды в носовые балластные цистерны.

Креново-дифферентная система является неотъемлемой частью нефтеналивных судов, на которых её используют для придания крена и дифферента, необходимых при погрузке и выгрузке нефтепродуктов.

Балластная система состоит из цистерн (отсеков) для водяного балласта; насосов и трубопроводов для его приёма и выкачки; измерительных труб или других средств контроля количества принятого балласта; воздушных труб для обеспечения входа и выхода воздуха в балластные цистерны. Балластные цистерны стремятся располагать

как можно ниже. Это способствует повышению остойчивости судна и облегчает наполнение цистерн (в том числе самотёком).

На крупных судах, нефтенавалочниках, ледоколах для быстрой перекачки больших масс балласта в балластных системах используют осевые насосы, в том числе реверсивного действия, а трубопроводы выполняют в виде корпусных коридоров с разгрузочными каналами, сообщающимися с атмосферой [1].

К балластным системам предъявляют следующие основные требования:

1. Они должны обеспечивать заполнение и опорожнение каждой цистерны в отдельности, а также одновременно нескольких или всех цистерн;

2. Обеспечивать возможность перекачки балласта из одной цистерны в другую;

3. Их устройство должно исключать возможность попадания воды в балластные цистерны из-за борта и из балластных цистерн в другие отсеки и цистерны.

Для размещения балластных цистерн обычно используют форпик и ахтерпик, а на судах с двойным дном – отсеки междудонного пространства. Вместимость балластных цистерн и их расположение предусматриваются такими, чтобы обеспечивался приём балласта в количестве, необходимом для изменения осадки и посадки судна.

На некоторых судах осуществляют дистанционный контроль за уровнем воды в балластных цистернах с помощью датчиков, показания которых передаются на пост управления, где выполняются нужные операции по управлению системой.

Балластную систему современных грузовых судов строят, как правило, по централизованному принципу. Схема системы данного типа приведена на рис. 1.

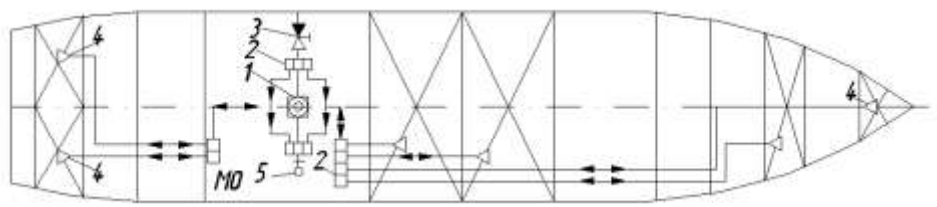


Рис. 1. Принципиальная схема балластной системы, выполненной по централизованному принципу: 1 – насос; 2 – клапанная коробка; 3 – невозвратно-запорный клапан; 4 – приёмник; 5 – днищевой кингстон

Это позволяет не только наполнять и осушать балластные цистерны, производя управление из машинного отделения, но и перекачивать воду из одних цистерн в другие. Осушение балластных цистерн производится через тот же трубопровод, что и их наполнение. С целью обеспечения данного условия клапанные коробки балластной системы выполняются запорного типа.

По централизованному принципу осуществлены балластные системы на сухогрузных теплоходах типа «Большая Волга» (г/п 2000 т) и «Волго-Дон» (г/п 5000 т), на грузовых судах смешанного плавания типа «50 лет Советской власти» г/п (3300), на танкерах (г/п 5000 т) и др.

На судах старой постройки, а также небольшого водоизмещения и специальных, с малым числом балластных цистерн, можно встретить балластные системы, выполненные по децентрализованному принципу. Их схема приведена на рис. 2.

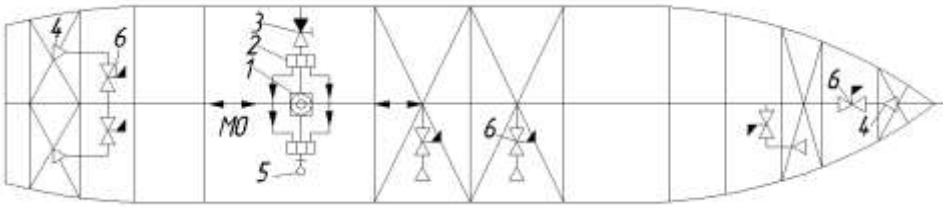


Рис. 2. Принципиальная схема балластной системы, выполненной по децентрализованному принципу: 1 – насос; 2 – клапанная коробка; 3 – невозвратно-запорный клапан; 4 –приемник; 5 – днищевой кингстон; 6 – клапан с палубным приводом

Балластные трубопроводы на современных судах прокладываются как в междудонном пространстве, так и поверх второго дна. Во втором случае предусматривают конструктивную защиту от возможных повреждений грузом.

Трубы и арматуру изготовляют из тех же материалов, что и для осушительной системы (сталь и бронза соответственно). Число и места расположения приёмников балластного трубопровода выбирают из условия обеспечения максимально удобной откачки балласта из любой цистерны, независимо от того, находится ли судно в прямом или накренённом положении. На плоскодонных судах, когда днище имеет подъём к бортам менее 5°, приёмные трубы в балластных цистернах прокладывают по бортам. На острокильных судах, а также в цистернах, расположенных в оконечностях, бортовые приёмные трубы отсутствуют. Каждая половина цистерн, которые делятся продольной переборкой на две части, должна иметь по одной приёмной трубе у ДП.

Забортная вода в балластные цистерны принимается через кингстоны или клинкеты. С целью предохранения приёмной арматуры от засорения, на всех приёмных отверстиях в наружной обшивке корпуса располагают съёмные защитные решетки. Вода, пар или сжатый воздух для продувания приёмного отверстия и решёток подводятся через клапаны продувания. Ящики забортной воды снабжают задвижками, устанавливаемыми в ящиках, на обшивке корпуса. С помощью задвижки можно прекращать поступление воды в ящик и осушать его на период зимнего отстоя судна.

Балластировка судна является важным элементом его эксплуатации. Однако приём жидкого балласта влечёт за собой ряд негативных последствий, а применение традиционных балластных систем не обеспечивает их предотвращения. В настоящее время наиболее острой проблемой, связанной с применением балластных вод, является проблема экологического загрязнения внутренних водоёмов чужеродными организмами. Инвазивные чужеродные виды являются второй по значению угрозой биоразнообразию природных экосистем (после разрушения мест обитания) [2], а развитие их в новом регионе приводит к весьма серьёзным экологическим, социальным и экономическим последствиям и представляет собой значительную угрозу экологической безопасности России.

Проблема экологического загрязнения водоёмов, вызываемая сбросом балластных вод с судов, имеет выраженную актуальность не только для России, но и для всех стран с развитым судоходством. В связи с этим в 2004 г. мировым сообществом принята «Международная Конвенция по контролю и обработке судового водяного балласта и осадков» (International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments,) (далее Конвенция) [3]. Конвенцией предусмотрены два стандарта, касающиеся балластных вод: D-1 – стандарт замены балластных вод и D-2 – стандарт качества балластных вод [4]. Оба стандарта крайне важны для судовладельцев, как при эксплуатации существующего флота, так и при приобретении новых судов.

Стандарт D-1 предусматривает, что теплоходы, построенные до 2009 г. и имеющие объём балластных танков от 1500 до 5000 м^3, могут до 2014 г. выполнять требования конвенции, используя способ замены балласта. Для этого на каждом судне должен иметься план балластных операций, учитывающий безопасные и эффективные процедуры по замене балласта. К 2014 г. все эксплуатирующиеся суда смешанного плавания, за исключением теплоходов типа СТК, необходимо оснастить системами обработки балластных вод по стандарту D-2 (суда типа СТК – к 2016 г.).

Суда, построенные в 2009 году и позже, с балластными танками до 5000 м^3 должны удовлетворять стандарту D-2 с момента постройки.

На рис. 3 приведена схема контроля балластных вод, установленная Конвенцией.

Конвенция должна вступить в силу через 12 месяцев после ратификации её 30 государствами, представляющими 35% общемирового торгового тоннажа. На конец мая 2011 г. 28 государств, представляющих 25,43% , ратифицировало эту Конвенцию.

По этой причине, в настоящее время, в России и за рубежом активно ведутся разработки в области обезвреживания и обеззараживания судовых балластных вод.

Рис. 3. Схема контроля балластных вод, установленная Конвенцией

Для предотвращения экологического загрязнения водоёмов балластными водами с судов Конвенцией рекомендовано применять замену балласта на удалении 200 морских миль от ближайшего берега, в местах с глубиной воды более 200 м. Однако данное решение проблемы не применимо для судов внутреннего и смешанного плавания, район эксплуатации которых ограничен 20, 50 и 100-мильной зоной удаления от берега. В то же время данная проблема наиболее актуальна именно для этих судов.

На настоящий момент разработано более 2000 способов обезвреживания и обеззараживания балластных вод. По принципу, применяемому при очистке вод, они делятся на следующие группы:

- физические (безреагентные);
- механические;
- химические (реагентные);
- комбинированные;
- биологические.

К *физическим* методам очистки относят нагревание, обработку ультразвуком, ультрафиолетовое облучение, обработку магнитным полем, применение АВС (аппаратов вихревого слоя). К примеру, компания Hyde Marine BWTS предлагает решение, основанное на отделении твёрдых частиц и обработке воды ультрафиолетовым излучением [5]. Система Hyde Marine использует штатные балластные насосы и трубопроводы. Разработаны и стандартные системы производительностью от 60 м^3/час до 1500 м^3/час, а также специальные системы производительностью до 6000 м^3/час. Система включает необходимую предварительную обработку для удаления твёрдых частиц и крупных водных организмов. Для более мелких балластных систем и устройств, где требуется лучшее удаление крупных частиц, Хайд-фильтр является экономичным и практичным. УФ-излучение разрушает или инактивирует биологиче-

ские организмы, включая зоопланктон, водоросли, бактерии и патогенные микроорганизмы из балластной воды, не оказывая влияния на эксплуатацию судна. При дебалластировки судна балластная вода также подвергается УФ-обработке.

Основными методами *механической* очистки являются фильтрование, внесение изменений в конструкцию судна, применение специальных покрытий танков. Наглядным примером эффективного применения данного метода очистки является использование системы непрерывного обновления судовой балластной воды, принцип работы которой основан на непрерывном протекании жидкости через систему с открытыми входом и выходом. При этом, за счёт инжекционного эффекта, создаваемого набегающим потоком воды, исключается образование застойных зон в конструктивных карманах балластных цистерн [6]. Покрытие внутренней части балластных цистерн и трубопроводов специальными защитными составами повышает эффективность данного метода и предотвращает негативные последствия от попадания в водоёмы ржавчины, нефтепродуктов, механических примесей и другие загрязняющих веществ.

Химические методы очистки балластных вод основаны на добавлении в них реагентов. Наиболее распространёнными методами химической очистки являются озонирование, хлорирование, удаление кислорода, применение биореагентов.

Использование хлора как дезинфицирующего средства для обработки судовых балластных вод получило распространение в некоторых странах Латинской Америки (Чили, Аргентина) после того, как была доказана взаимосвязь сброса балластных вод с судов, прибывших из азиатских портов, и вспышек в этих странах холеры.

Этот метод может быть ограничен в силу значительной продолжительности процесса обработки, зависимости её эффективности от температуры воды и уровня pH, распространённости хлоррезистентной микрофлоры, образования галогенсодержащих канцерогенов, экологических проблем сброса больших масс хлорированных вод в акватории портов.

Диоксид хлора, как окислитель и дезинфектант, нашел широкое применение в технологиях водоподготовки в силу существенного преимущества по сравнению с другими распространёнными средствами (озоном, хлором и хлораминами), а именно оптимальном соотношении биоцидной эффективности, стабильности и последействий как основополагающих критериев оценки химических дезинфектантов.

Среди *комбинированных* методов известна электро-химическая обработка и одновременная обработка балластных вод ультрафиолетом и (или) озонированием.

На основе комбинированного способа очистки работает система SEDNA. Эта система фирмы Hamann (Safe Effective Deactivation of Non-indigenous Aliens, – безопасная эффективная дезактивация инородных видов в судовых балластных водах) представляет собой встроенную систему обработки балластных вод. Она обрабатывает воду и осадок и может быть установлена на многие типы судов [7]. Система SEDNA состоит из гидроциклонов для удаления осадка, самоочищающегося фильтра 50m для эффективного удаления широкого спектра организмов и полностью биоразлагающего оксиданта (PERACLEAN Ocean) для эффективной дезактивации оставшихся организмов.

Широкую известность получила и система Pure Ballast. Это высоко технологичная система управления качеством балластной воды, осуществляющая фильтрацию и обработку УФ-излучением. Она настолько эффективна, что может уничтожать микроорганизмы размером до 10 мкм [8]. Система полностью компьютеризирована и работает в автоматическом режиме. Во время балластировки главный балластный насос системы Pure Ballast сначала прокачивает воду через фильтр с размером ячейки 50 мкм, предотвращающий попадание внутрь более крупных организмов. Далее вода проходит через один или несколько блоков усовершенствованной окислительной очистки (advanced oxidation technology – активированные окислительные технологии (АОТ)), где под действием интенсивного УФ-излучения уничтожаются все микроорганизмы.

Данная технология работает как в чистой, так и в мутной воде. Вода обеззараживается повторно по технологии АОТ при дебалластировке для нейтрализации любого роста микроорганизмов, который мог произойти во время плавания. В зависимости от количества установленных АОТ-блоков система Pure Ballast может обрабатывать от 250 до 2500 $м^3$/ч.

На основе комбинированного метода работает также система очистки Unitor, предлагаемая компанией Wilhelmsen Ships Equipment, которая предполагает обработку балластной воды на этапе приёма. Система Unitor сочетает в себе технологии кавитации и электрохлорирования с окислением озоном. Кавитация и применение дезинфицирующих средств происходит в корпусе реактора, в то время как фильтр удаляет крупные живые организмы и примеси. Фильтр размером 40 мкм установлен непосредственно за балластным насосом. Он самоочищается путём обратной промывки, которая включается по истечении заданного промежутка времени или после выявления заданного перепада давления [9].

Биологический способ обработки балласта заключается в добавлении в балластную воду хищных или паразитарных организмов с целью уничтожения вредных водных организмов. Данный метод является наименее удобным из всех вышеперечисленных, в связи с тем, что практически невозможно подобрать вид хищных организмов, который бы универсально подходил для уничтожения всех нежелательных организмов в балластной воде.

Каждый из перечисленных способов обезвреживания и обеззараживания балластных вод имеет свои достоинства и недостатки (см. табл.).

Таблица

Сравнительная характеристика эффективности различных способов обезвреживания (обеззараживания) балластных вод

Способ обезвреживания (обеззараживания)	Степень эффективности	Недостатки
Физический	4	Необходимость закупки дорогостоящего оборудования и обучения экипажей для его эксплуатации
Механический	3	Затраты на приобретение оборудования и покрытий для танков. Усложнение корпусных конструкций судна
Химический	3	Недостаточная эффективность. Необходимость закупки дорогостоящего оборудования, реагентов, затраты на их доставку на судно и обучение экипажей
Комбинированный	5	Большие затраты на приобретение и эксплуатацию оборудования (обуславливается наличием двух степеней очистки)

Кроме перечисленных, известен метод обезвреживания балластных вод путём длительного пребывания их на судне (более 100 суток) и обеззараживание балластных вод на береговых очистных сооружениях. Первый метод является неприемлемым в связи с тем, что средняя продолжительность рейса на судах внутреннего и смешанного (река-море) плавания составляет (5…14) сут. Сдача же балластных вод с судов на береговые очистные сооружения значительно увеличит нагрузку на них и вызовет простои флота на длительные промежутки времени. Выполнение рекомендаций по забору балласта на строго определённых участках и забор субмаринных (субаквальных) пресных вод в качестве балласта также значительно усложнит процесс эксплуатации флота. Все эти факторы неизбежно повлекут за собой значительные экономические издержки, что наглядно иллюстрируют графики, приведённые на рис. 4.

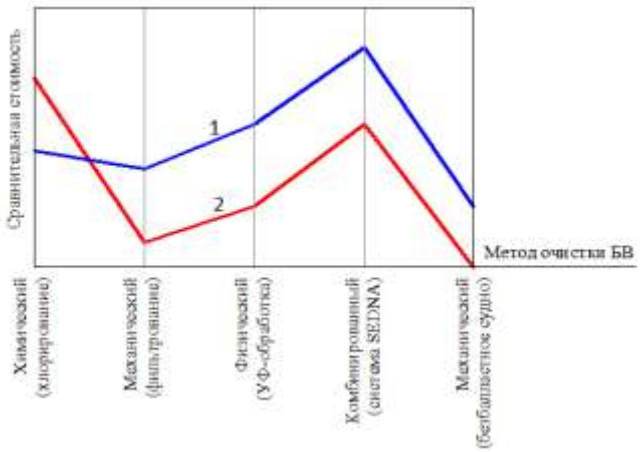


Рис. 4. Сравнительная стоимость оборудования и эксплуатации для различных способов обезвреживания и обеззараживания балластных вод:
1 – стоимость оборудования для обеззараживания (обезвреживания) балластных вод; 2 – стоимость его эксплуатации.

Анализ рис. 4, а также рассмотренных методов очистки балластных вод показывает, что их практическое применение значительно усложняет эксплуатацию судна, требует специальной подготовки экипажей, значительных затрат на закупку оборудования и реагентов, их доставку на судно, хранение и пр. Нельзя не принимать во внимание и то, что системами очистки балластных вод на настоящий момент оборудовано незначительное количество судов и объективно оценить их эффективность пока не представляется возможным. В результате этого доверие судовладельцев и операторов судов к данным системам невелико [10].

Методы обеззараживания балластных вод путём установки на судах дополнительного оборудования, имеют актуальность для уже построенных и введённых в эксплуатацию судов. Для вновь строящихся судов более рациональными представляются решения, основанные на изменении принципов работы балластных систем.

Весьма интересными в этой связи представляются разработки американских и японских судостроителей в области создания безбалластных судов [11]. Подобные работы активно ведутся и российскими учёными [6].

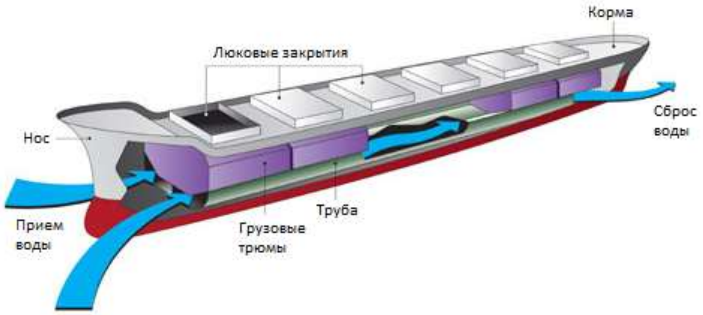


Рис. 5. Графическая иллюстрация концепции безбалластного судна

Концепция безбалластного судна предполагает, в частности, что традиционные балластные цистерны будут заменены системой (комплексом) трубопроводов, проходящих в корпусе судна ниже ватерлинии. Вода поступает в трубопроводы самотёком через систему шпигатов, расположенную в носовой оконечности ниже ватерлинии. Её

отвод снова в водоём предусматривается осуществлять через подобную же систему шпигатов, расположенную в районе кормовой оконечности. Управление задвижками, открывающими и закрывающими шпигаты, должно осуществляться дистанционно из центрального поста управления судном. Концептуальная схема такого судна [11] приведена на рис. 5, а вариант конструктивного решения по размещению балластных трубопроводов в корпусе судна, на рис. 6.

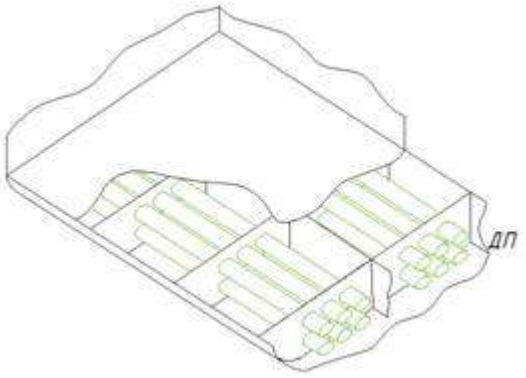


Рис. 6. Фрагмент корпуса судна в районе пролегания балластных трубопроводов

Внедрение новых принципов работы балластных систем на судах предполагает ряд усовершенствований и в архитектурно-конструктивном облике судна, в частности:

1) размещение надстройки в средней части судна. Это позволит уменьшить дифферент судна при ходе порожнём, сократить необходимый для удифферентовки объём балластных вод (общую протяжённость балластных трубопроводов), улучшит обзор из центрального поста управления (рулевой рубки), повысить уровень комфортности жилых и служебных помещений.

2) изменение конструктивного оформления балластных цистерн с целью оптимизации трассировки балластных трубопроводов, повышения их производственной и эксплуатационной технологичности и ремонтопригодности.

При проведении разработок в области создания балластных систем нового поколения особое внимание следует уделить обоснованию трассировки балластных трубопроводов в корпусе судна и их конструкции, так как установка в корпусе дополнительной системы трубопроводов неизбежно повлечет за собой увеличение его металлоёмкости. Как вариант, может быть предложено применение балластных трубопроводов из полимерных материалов. Кроме снижения металлоёмкости, их применение позволит избежать проблем, связанных с коррозионным износом трубопроводов.

На наш взгляд внедрение проточных балластных систем имеет ряд конкурентных преимуществ и для управления качеством балластных вод, в частности способствует:

- исключению накопления инвазивных чужеродных микроорганизмов в балластных цистернах судов;
- решению проблемы экологического загрязнения внутренних водоёмов балластными водами;
- экономии топливно-энергетических ресурсов (исследования [11], проведённые специалистами Мичиганского университета (США), подтверждают, что применение систем проточного балласта снижает расход топлива при порожнем рейсе судна до 6% по сравнению с судном с традиционной компоновки;
- исключению необходимости установки на судне дорогостоящего, тяжеловесного и крупногабаритного насосного оборудования для приёма и сброса балласта, а также специального оборудования для обезвреживания и обеззараживания балластных вод.

Таким образом, разработка принципиально новых типов балластных систем позволит не только решить проблему экологического загрязнения водоёмов балластными водами с судов, но и позволит достичь значительных экономических выгод при эксплуатации судна.

Список литературы

[1] Балластная система. Интернет: [http://www.sealib.com.ua/question /32. html].
[2] Сустретова Н.В. Обеспечение экологической безопасности балластных вод на судах смешанного «река-море» плавания: Дисс. канд. техн. наук: 03.02.08 – Н.Новгород, 2011. – 140 с.
[3] Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими, 2004, – СПб.: ЗАО ЦНИИ МФ, изд. 2005 г. – 120 с.
[4] Система обработки балластных вод DESMI A/S – решение серьезной экологической проблемы. URL: [kron.spb.ru›page/89/news/330/].
[5] Балластные Системы компании Hyde Marine- Практическое решение проблемы водообработки балластных танков. URL: [marconost.ru›index.php?id=87].
[6] Патент RU №85143 U1 Система обновления судовой балластной воды. Опубл. 27.07.2009. Бюл. №21. МПК: B63B 39/03, B63B 43/06.
[7] SEDNA® (Safe Effective Deactivation of Non-indigenous Aliens): новая система обработки балластных вод. URL: http://www.mbsz.ru/ Морской бизнес северо-запада № 3 сентябрь 2005.
[8] Установка для очистки балластной воды Pure Ballast. URL: http://www.korabel.ru/ equipment/item_view/130146.html.
[9] КОНФЕРЕНЦИЯ WILHELMSEN SHIPS SERVICE. URL: [directevent.ru›meropriyatiya/ wilh/181110.html].
[10] Балластные воды-серьезная проблема. URL: http://maritime-zone.Com /articles/ballastnye%20vody%20sereznaya%20problema/.
[11] Американцы спроектировали грузовое судно без балласта. URL: http://www.dived.ru/ events/amerikantsyi-sproektirovali-sudno-bez-ballasta. Html.

ANALYSIS OF PRESENT-DAY AND PROSPECTIVE BALLAST SYSTEMS OF RIVER AND RIVER-SEA VESSELS

V.V. Zakharova, E.G. Burmistrov

The use of ballast on ships is necessary for operating them efficiently. However, the use of liquid ballast entails a number of negative consequences, such as high energy consumption of ballast equipment, over-expenditure of fuel and lubricants, pollution of bodies of water with foreign microorganisms, etc. The traditional methods of solving these problems are not sufficiently efficient for economic reasons. It would be more rational to introduce the principles of ballast-free boat into the practice of shipbuilding. In order to develop such a concept an analysis has been carried out in this article of present-day and prospective ballast systems of river and river-sea vessels.

УДК 629.122/.123.004.67(083)

***О.К. Зяблов**, к.т.н., доцент, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
***Е.В. Фунтикова**, к.т.н., доцент, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

ГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ РЕМОНТА В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОННЫХ АКТОВ ДЕФЕКТАЦИИ ПО КОРПУСУ И ДРК СУДНА

Рассматриваются вопросы развития автоматизированной системы технологической подготовки судоремонтного производства, связанные с разработкой в электронном виде растяжек листов наружной обшивки набора корпуса и карт обмера деталей ДРК по результатам дефектации.

В общей системе подготовки производства к ремонту судна технологическая подготовка производства является наибольшей по объему выполняемых работ и представляет собой совокупность мероприятий, включающих определение объема и состава ремонтных работ и обеспечивающих технологическую готовность производства. Это длительный и трудоемкий процесс, содержащий анализ результатов дефектации, написание ведомостей предстоящего ремонта, определение объемов и стоимости работ, разработку и обеспечение технологических процессов и т.д.

Исходными данными для технологической подготовки судоремонтного производства являются акты дефектации основных элементов судна. Акты содержат описание технического состояния этих элементов с указанием эксплуатационных дефектов и способов их устранения, а также приложения, с конструктивным описанием объектов ремонта в виде растяжки листов обшивки и набора корпуса и карт обмера с эскизами деталей и узлов. Выходные данные включают комплект ремонтной документации: ремонтные ведомости, калькуляции, сметы, технологические карты ремонтных процессов, ведомости материалов и комплектующих изделий и прочее.

С целью автоматизации этого вида подготовки ремонтного производства на кафедре «Проектирования и технологии постройки судов» ВГАВТ разработано программное обеспечение в системе ACCESS. Оно включает программы: «Дефектация» – для подготовки и формирования электронных актов заводской дефектации и «Ведомость ремонта» – для автоматизированного расчета трудоемкости, отпускной стоимости ремонтных работ и формирования полного пакета ремонтной документации. В этой же системе разработана реляционная модель баз данных по дефектации и способам ремонта, объединяющая указанные программы. Данные программы успешно внедрены на ряде предприятий отрасли [1].

Электронные формы актов дефектации включают таблицы замеров остаточных толщин, деформаций и дефектов корпуса, контроля параметров деталей механизмов и полностью соответствуют требованиям Российского Речного Регистра. Однако анализ подготовки ремонтной документации на судоремонтных предприятиях показал что, во многих случаях приложения к актам дефектации разрабатываются вручную и технологические процессы ремонта составляются в рукописном виде. При этом технологические карты на ремонтные работы не разрабатываются, в цех поступают наряд-заказы или технические распоряжения, оформленные на основании ремонтной ведомости или сами ведомости. Отсутствие карт на технологические процессы ремонта отрицательно влияет на качество ремонтных работ, которое в данном случае целиком зависит от опыта и умения мастера и рабочих, а применение технологий фактически ограничивается знаниями технолога.

Система комплексной автоматизации технологической подготовки судоремонтного производства предполагает автоматизацию проектирования технологических процессов ремонтного производства. Для поставленных целей представляется возможным использование одной из систем, разработанных для машиностроения типа КОМПАС-АВТОПРОЕКТ, T-FLEX [2]. Например, система проектирования технологических процессов T-FLEX/техноПро реализована на основе ACCESS, что позволяет создать единый комплекс автоматизации технологической подготовки судоремонтного производства.

Первым этапом в реализации автоматизированного проектирования технологических процессов является графическое моделирование объектов ремонта с экспликацией характерных дефектов для основных элементов судна в составе приложений к актам дефектации.

По корпусу:

– выполнение растяжки листов наружной обшивки корпуса в электронном виде или использование существующих для новых проектов судов;

– создание базы данных по износам элементов конструкций, местным остаточным деформациям (вмятинам, бухтинам, гофрировкам и т.д.), трещинам, пробоинам, разрывам и прочим дефектам [3];

– разработка программы нанесения эксплуатационных дефектов на растяжку наружной обшивки, используя данные таблиц замеров остаточных толщин, деформаций и дефектов корпуса электронных актов дефектации.

По ДРК:

– разработка электронных карт обмера деталей и сборочных единиц (валопровода и рулевого устройства);

– создание базы данных эскизов деталей с выделением поверхностей сопряжений, разбивкой на технологические зоны, с указанием плоскостей замеров, износ и дефектация которых наиболее вероятны в процессе эксплуатации. База данных должна содержать эскизы основных деталей валопровода (винт гребной, вал гребной, вал промежуточный, вал концевой, подшипники кронштейна и дейдвуда и др.) и рулевого устройства (баллер, руль, насадка, втулки верхнего и нижнего подшипников и др.) [4];

– разработка таблиц с указанием характерных дефектов, допустимых размеров и отклонений при дефектации в электронном виде;

– автоматизация расчетов значений для характерных дефектов (конусность, овальность, отклонения от цилиндричности, отклонения от конусности и др.).

Электронные карты обмера деталей, растяжки наружной обшивки являются входным материалом, основой для автоматизации проектирования технологических процессов ремонта, разработки маршрутных, операционных, слесарно-монтажных карт и пр. То есть служить переходным звеном процесса интеграции программ «Дефектация» и «Ведомость ремонта» с адаптированной программой проектирования технологических процессов и формирования общей информационной базы данных. В настоящее время пока единого комплекса автоматизации технологической подготовки на судоремонтных предприятиях не существует, электронные карты обмера и растяжки могут передаваться в цеха в качестве приложений к техническим распоряжениям, цеховым наряд-заказам, ремонтным ведомостям.

Разработка и внедрение электронных форм карт обмера деталей и узлов, растяжек наружной обшивки корпуса с экспликацией эксплуатационных дефектов позволит комплексно решать вопросы формирования технологических процессов ремонта, повысить качество ремонтной документации, сократить трудоемкость и сроки технологической подготовки производства, отслеживать техническое состояние корпуса и судовых механизмов на протяжении всего жизненного цикла судна.

Список литературы

[1] Зяблов О.К. Программное обеспечение подготовки ремонтной документации для предприятий речного транспорта / О.К. Зяблов, А.Б. Корнев., Е.В. Фунтикова // Речной транспорт (XXI век), №3 (39), 2009. – С. 80 – 82.
[2] Зяблов О.К., Фунтикова Е.В. Структура системы комплексной автоматизации технологической подготовки судоремонтного производства / Международный научно-промышленный форум «Великие реки – 2010»: Труды конгресса – НГАСУ, 2011.
[3] Корпуса стальных судов внутреннего и смешанного плавания. Типовые технологические процессы ремонта. ТТП 212.2002-05-07/ Минтранс России Федеральная служба речного флота ФГУП ЦКБ НПО «Судоремонт». – Н. Новгород: НПО «Судоремонт», 2002. – 148 с.
[4] УР 212.004.012-00. ДРК серийных сухогрузных судов. Общие технические условия на ремонт/ Минтранс России Федеральная служба речного флота ФГУП ЦКБ НПО «Судоремонт». – Н. Новгород: НПО «Судоремонт», 2000. – 242 с.

GRAPHICS MODELING OF REPAIR ITEMS INCLUDED IN HULL AND PROPULSION AND STEERING ASSEMBLY FAULT FINDING SHEETS PRESENTED IN ELECTRONIC FORM

O.K. Zyablov, E.V. Funtikova

Problems connected with the development of an automated system of technology process preparation of ship-repair production are considered. The problems relate to presenting in electronic form both outer hull plating sheets and component measurement cards of propulsion and steering assembly based on fault finding results.

УДК 629.12

Кочнев Ю.А., *к.т.н., ассистент ФБОУ ВПО «ВГАВТ»,*
Роннов Е.П., *д.т.н., профессор ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Н. Новгород, ул. Нестерова, 5А.

ОБОСНОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОБЩЕЙ ПОЛНОТЫ ТАНКЕРА СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ

Рассмотрена целесообразность проектирования танкеров смешанного (река-море) плавания с сверх высокими коэффициентами общей полноты. Предложена методика и приведены результаты тестовых расчётов по обоснованию значения δ на начальных этапах проектирования, с учётом особенностей линии эксплуатации и вероятностных условий ветра-волнового режима при ходе судна.

В последние годы выявилась тенденция к увеличению коэффициента общей полноты корпуса судна. В работе [1,2] на основе анализа эксплуатации двух судов проекта 005RST01 сделаны выводы о целесообразности применения сверхвысоких коэффициентов общей полноты. При этом не приводится методика, по которой определялась эффективность судов, а главное каким образом учитывалось влияние волнения и потери скорости на мелководье, что весьма актуально для судов с полными обводами. В то же время в [3] справедливо утверждается, что наличие ограниченного фарватера и большие значения коэффициента общей полноты приведут к отрыву пограничного слоя и резкому возрастанию коэффициента сопротивления.

На практике часто возникает необходимость определить оптимальную грузоподъёмность судна, главные размерения которого известны и приняты максимальными

для предполагаемой линии эксплуатации. То есть, задача сводится к обоснованию максимально возможного значения коэффициента общей полноты, так как при его увеличении с одной стороны (при фиксированных главных размерениях) возрастает водоизмещение судна, его грузоподъёмность, следовательно, получаемый доход от перевозок. Но в тоже время растёт мощность энергетической установки, эксплуатационные расходы. Подобная постановка задачи рассматривается, например, в [1].

Математически задача может быть сформулирована следующим образом: пусть вектор исходных данных X составляют длина, ширина, осадка, мощность или скорость хода, архитектурно-конструктивный тип судна, необходимо найти такие значения коэффициента общей полноты, чтобы функция цели достигала экстремума и выполнялись ограничения:

$$\begin{aligned} k_{opt} &= f\left(X,\delta,u\right) \to \min\left(\max\right), \\ q_s\left(X,\delta,v\right) &= 0 \quad s \in S_1, \\ q_s\left(X,\delta,v\right) &> 0 \quad s \in S_2, \end{aligned} \tag{1}$$

где

S_1 – ограничения в виде строгих равенств (уравнение масс, плавучести, ходкости);

S_2 – ограничения в виде неравенств (условие обеспечения остойчивости, вместимости и т.д.) [4].

Модель оптимизации элементов танкера подробно рассмотрена в [4]. Однако, учитывая существенное влияние на выбор коэффициента δ, точности расчёта ходкости судна рассмотрим этот вопрос подробней. Математически модель ходкости судна в общем виде можно записать следующим образом.

$$\begin{cases} P_{\text{е}}\left(n,v,t,U\right) = R\left(v,S,U\right) \\ N = f\left(v,P_{\text{е}},t,\eta_в,\eta_n,U\right) \\ D_{\text{в}} = D_{opt}\left(v,\lambda_{\text{р}},N,n,\psi,\rho,K'_{\text{п}}\right) \end{cases}, \tag{2}$$

где P_e – упор движителя;

R – сопротивление воды движению судна;

n – частота вращения гребного вала;

v – скорость хода;

t – коэффициент засасывания;

$S = \left\{L,B,T,\delta,N',D,\ldots\right\}$ – вектор характеристик судна;

L,B,T,δ – главные элементы судна;

N' – вектор характеристик главного двигателя;

$U = \left\{H_{\text{фi}},h_j,B_{\text{сх}},\ldots\right\}$ – вектор путевых условий;

$H_{\text{фi}}$ – глубина судового хода на i-ом участке;

h_j – волнение j-ой обеспеченности;

$B_{\text{сх}}$ – ширина судового хода;

$D = \left\{D_в,H/D,\lambda_р,\eta_в,\ldots\right\}$ – вектор характеристики гребного винта;

$D_в$ – диаметр гребного винта;

$\lambda_р$ – относительная поступь;

$\eta_в$ – пропульсивный КПД;

$\eta_п$ – КПД передачи;

ψ – коэффициент попутного потока;

ρ – плотность среды;

$K'_{п}$ – коэффициент мощность-частота вращения.

Принятая методика расчёта сопротивления и скорости хода на глубокой воде и на мелководье рассмотрена в [5], и реализует пересчёт кривой остаточного сопротивления с судна-прототипа с использованием коэффициентов влияния Авдеева, расчёт пропульсивного коэффициента полезного действия движителя по диаграммам для расчёта гребных винтов; и учёт потери скорости на волнении по эмпирической формуле [6]:

$$\frac{\Delta v}{v} = 50\left(\frac{h_{1/3}}{L}\right)^2\left[Fr^{-1} - 3\left(\frac{h_{1/3}}{L}\right)^{1/4}\right], \qquad (3)$$

где

$\Delta v/v$ – относительная потеря скорости;

$h_{1/3} = 0,75h$ – высота значимых волн;

h – высота расчётной волны.

С учётом приведённых зависимостей возможно более точное решение задач, обоснования коэффициента общей полноты.

Для анализа влияние увеличения коэффициента общей полноты на технико-эксплуатационные показатели работы нефтеналивного судна была разработана математическая модель и программное обеспечение оптимизации главных элементов танкеров смешанного (река-море) плавания.

В качестве примера рассмотрим влияние коэффициента полноты на эффективность танкера с размерениями: L=135,0 м, B=16,6 м, T=4,0 м и постоянной мощностью главных двигателей. Выбранные главные размерения близки к максимальным для эксплуатации судна на ВВП с выходом в Балтийское море на северо-западе, Каспийское и Азовское моря на юге России. На рисунке 1 показана полученная на основе систематических расчётов по модели (1) – (2) зависимость критерия оптимальности танкера от изменения коэффициента общей полноты. При этом в качестве критерия принята относительная прибыль от эксплуатации (рис. 1).

$$k = \ddot{I}\ (\delta)/\Pi_{\delta=\min},$$

где

$\Pi(\delta)$ – прибыль при рассматриваемом значении коэффициента полноты,

$\Pi_{\delta=\min}$ – прибыль при минимальном значении коэффициента полноты.

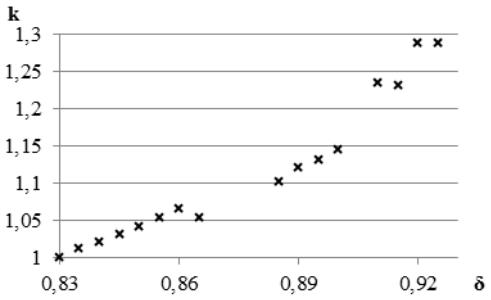


Рис. 1. Зависимость относительной прибыли танкера от коэффициента полноты

Наличие на графике скачков функции цели более 5% обусловлено прерывностью математической модели, являющееся следствием дискретности ряда двигателей, толщин обшивки корпуса и т.д. Рост коэффициента общей полноты приводит к плавному незначительному росту, а при δ>0,92 можно наблюдать некоторое снижение относи-

тельной прибыли. Подобная тенденция наблюдается и при фиксированной скорости хода танкера, когда мощность судна изменяется (рис. 2).

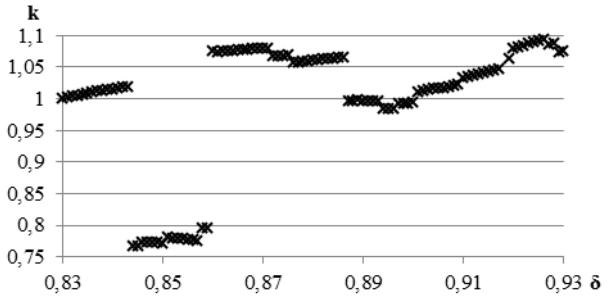


Рис. 2. Зависимость относительной прибыли танкера от коэффициента общей полноты при постоянной скорости (v=18 км/ч)

Из анализа зависимости $k = f(\delta)$ рисунка 2 видно, что увеличение коэффициента δ позволяет повысить эффективность танкера. Проанализировать как ведёт себя целевая функция при δ>0,93 не представляется возможным, поскольку авторам не известны аналитические методы расчёта ходкости при столь высоких значения коэффициента общей полноты. К тому же его дальнейшее увеличение приведёт к обводам не характерным для самоходных судов. По нашему мнению этим и объясняется отсутствие подобных методик.

Провозоспособность танкера и его энергозатраты зависят от скорости хода, а, следовательно это должно отражаться и на оптимальном значении коэффициента общей полноты. На рисунке 3 приведён график зависимости критерия оптимальности от коэффициента общей полноты при различных скоростях хода, «сглаженные» по методу наименьших квадратов для танкера с указанными выше главными размерениями.

По этим графикам можно сделать вывод, что с ростом коэффициента полноты, и следовательно, грузоподъёмности, эффективность танкера увеличивается.

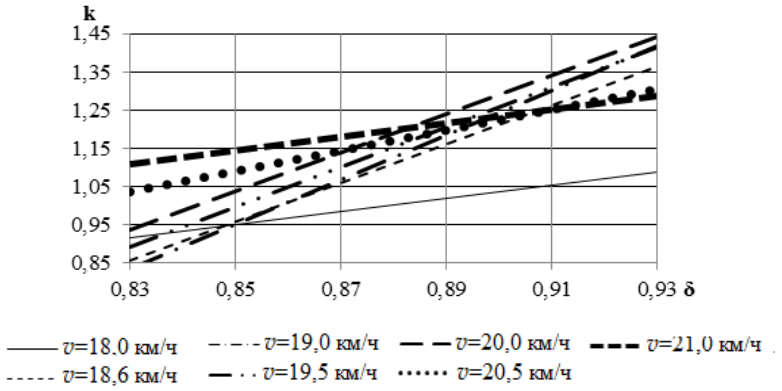


Рис. 3. Зависимость относительной прибыли танкера от коэффициента полноты и скорости хода при постоянных главных размерениях (L=135 м; B=16,6 м; T=4 м; P=5085...5920 т)

Следует отметить, что приведённые выше результаты получены без учёта так называемой «внешней» задачи проектирования, когда необходимо освоить грузопоток за определённый срок. Результаты подобного расчёта позволяют только рекомендовать пути повышения эффективности танкера, за счёт увеличения его провозоспособности и показать общее влияние увеличения коэффициента общей полноты при различных скоростях хода судна.

Интересно рассмотреть обратную задачу, то есть, как влияет δ на эффективность танкера заданной грузоподъёмности. Когда увеличение коэффициента полноты требует соответствующим образом (по условию выполнения уравнения масс и плавучести) изменять осадку судна. изменять при этом длину и ширину, видимо, нецелесообразно, так как это может отрицательно сказаться на грузовместимости судна. На рисунке 4 представлено влияние δ на критерий эффективности танкера при фиксированной грузоподъёмности, по которому видна противоположная зависимость по сравнению с предыдущей постановкой задачи.

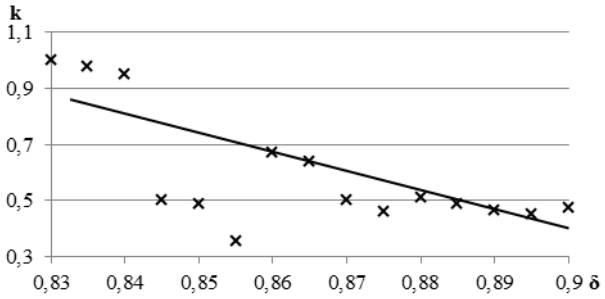


Рис. 4. Влияние коэффициента общей полноты на эффективность танкера при фиксированной грузоподъёмности

Снижение эффективности танкера объясняется увеличением его эксплуатационных расходов и времени рейса, тогда как доход не растёт.

Таким образом выбор сверх высоких значений коэффициента полноты водоизмещения следует считать оправданным, если при этом увеличивается грузоподъёмность судна и за счёт этого доход. Если грузоподъёмность судна зафиксирована, то увеличение δ в связи с ростом мощности и эксплуатационных расходов не целесообразно.

Список литературы

[1] Егоров Г.В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска / Г.В. Егоров. – СПб.: Судостроение – 2007,

[2] Егоров Г., Ефремов Н.А. Суда смешанного «река-море плавания в экономике России // Морской флот. №3. 2008. – с. 15–22.

[3] Горбачёв Ю.Н. К вопросу о некоторых новых тенденциях при проектировании грузовых судов ограниченного района плавания. /Ю.Н. Горбачёв // Судостроение – 2009. – № 5. с. 51–52.

[4] Кочнев Ю.А. Оптимизация танкера смешанного (река-море) плавания / Ю.А. Кочнев // Материалы межвузовской научно-практической конференции студентов и аспирантов. «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 12–13 мая 2010 года./отв.ред. О.А. Казмина. – СПб.: СПГУВК, 2010. – с. 84–87.

[5] Кочнев Ю.А. Обоснование модели расчёта ходкости судна / Ю.А. Кочнев // 12-й международный научно-промышленный форум «Великие реки ‘2010». Труды конгресса. Том 2. – Н.Новгород: ННГАСУ 2011. – с. 84–87.

[6] Справочник по теории корабля: в 3-х томах. Т2. Статика судов. Качка судов / под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение – 1985. – 440 с.

STUDY OF BLOCK COEFFICIENT FOR RIVER-SEA TANKER

U.A. Kochnev, E.P. Ronnov

The expediency of designing river-sea tankers with super high block coefficient is considered. The methodics is proposed and the results of test calculations for choosing the value of δ are presented at the initial stages of design allowing for peculiarities of exploration routes as well as the probable conditions of wind and wave regime during the progress of a ship.

УДК 629.124.9.039

В.И. Любимов, *д.т.н., проф. ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.
Ю.Г. Варакосов*, к.в.н., директор ассоциации «Экраноплан».*
В.И. Барышев*, ведущий конструктор ООО «ЭО Орион».*
119048, Москва, ул. Усачева 62, офис 8.

СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СФЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ЭКРАНОПЛАНОВ

Рассмотрены современные концепции использования экранопланов в транспортных системах, технико-эксплуатационные требования к новым судам. Приведены примеры перспективных сфер использования экранопланов.

Более чем полувековой опыт исследования эффекта опорной поверхности (экрана) и проблемы создания экранопланов (ЭП) привели к чрезвычайно большим объемам теоретических и экспериментальных знаний. Значительная активизация исследований по экранопланной практике произошла в начале 60-х годов XX века, когда стали реализовываться крупномасштабные проекты фундаментальных научных исследований и разработки опытных образцов ЭП. Почти одновременно комплексные исследования по проблеме ЭП стали выполняться в СССР (Р. Алексеев, А. Панченков, Р. Бартини), США (А. Липпиш), ФРГ (Х. Фишер, Г. Иорг) и Китае. В XX веке отдельными конструкторами и научно-исследовательскими центрами разных стран было построено более полусотни экспериментальных ЭП различного назначения. В настоящее время известно более 70 различных проектов ЭП, основную массу которых составляют небольшие экспериментальные аппараты. Однако лишь единицы из разработанных ЭП были запущены в коммерческую эксплуатацию. Одной из причин подобного состояния является сложность рассматриваемой проблемы и недостаточное выполнение фундаментальных и прикладных исследований в создании конкретных типов ЭП.

Известно, что генеральная стратегия создания ЭП опирается на два фундаментальных факта. Первый – существует положительный эффект экрана, при котором при движении крыла вблизи твердой границы существенно возрастает подъемная сила и снижается индуктивное сопротивление, так что аэродинамическое качество резко возрастает по сравнению с крылом самолета. Второй – спокойная поверхность воды является идеальным видом экрана, однако при появлении волн высотой 3м и более на ней значительно усложняются взлет и посадка ЭП и появляются жесткие требования к мореходности новых транспортных средств. Эта стратегия выдвигает на передний план задачу поиска в концепции создания того или иного типа ЭП компромисса между антагонистическими качествами: положительным (эффект экрана) и отрицательным (трудности взлета и посадки с воды). Уже на начальной стадии проектирования ЭП экспертиза должна дать ответ, насколько эффективно решена задача упомянутого компромисса, насколько необходимо осуществлять взлет и посадку ЭП с водной поверхности. Подробно эти актуальные вопросы рассмотрены в монографии «Экспертиза экранопланов» [1].

Высокая скорость, амфибийность, комфортные условия полета и экономичность ЭП привлекают интерес транспортных компаний возможностью качественно повысить эффективность перевозок на речных, морских и океанских трассах. Закономерно, что в крупных фирмах, занимающихся созданием новых транспортных средств, наряду с отработкой базовых схем ЭП, выполняются исследования по формированию на их основе транспортных систем различного назначения.

Для рентабельной работы ЭП, помимо требований безопасности движения, необходимо обеспечить регулярность рейсов по внешним условиям и эффективность обслуживания как пассажиров или грузов, так и самого транспортного средства. Применительно к ЭП эти условия обеспечиваются комплексом стартово-посадочных устройств, которые гарантируют мореходность судов и их выход на береговую площадку для технического обслуживания и ремонта. В экономическом отношении эффект экрана реализуется в основном за счет снижения расхода топлива при движении ЭП в крейсерском режиме, что непосредственно не связано с условиями базирования судна.

Выделяют две концепции использования ЭП в транспортных системах. Первая концепция «аэропорт – акватория», при которой ЭП, как самолет, взлетает с аэропорта, совершает полет над акваторией в приэкранном режиме, а затем совершает посадку в аэропорту назначения. Вторая концепция «гидропорт – акватория», при которой ЭП базируется на береговой площадке, стартует с водной поверхности, выполняет полет над акваторией в приэкранном режиме и возвращается на берег. У каждой из упомянутых концепций использования ЭП имеются определенные преимущества и недостатки, которые влияют на аэрогидродинамическую схему и конструкцию транспортного средства [2].

Концепция «аэропорт – акватория» ориентирована на традиционную авиационную инфраструктуру и не требует создания новой системы технического обслуживания ЭП. В конструкции ЭП, предназначенных для такой системы, можно использовать аэродинамическое совершенство самолетов для снижения сопротивления в экранном полете, поскольку нет необходимости в дополнительных устройствах для старта и посадки с водной поверхности. ЭП подобного типа будут обладать наибольшей экономичностью и дальностью полета в крейсерском режиме. Потенциальными районами эксплуатации таких ЭП могут рассматриваться морские и даже океанские трассы. Приведем пример. После многолетних исследований по концепции «аэропорт- акватория», как наиболее простой и не требующей разработки мореходных стартово-посадочных устройств ЭП, американская фирма «Боинг» заявила о намерении приступить к созданию коммерческой транспортной системы на базе сверхтяжелого самолета – экраноплана типа «Пеликан». В проекте используется эффект ЭП для повышения аэродинамического качества и передовые авиационные технологии [4].

Концепция «гидропорт – акватория» предполагает эксплуатацию ЭП в системе водного транспорта, в которой все транспортные операции осуществляются на воде. Для этой концепции характерен широкий спектр использования ЭП в различных вариантах: от прогулочных и служебных катеров до межконтинентальных контейнеровозов. Все созданные к настоящему времени ЭП ориентированы на подобный вариант транспортных систем.

По конструктивному устройству и условиям эксплуатации ЭП можно отнести и к водному, и к авиационному транспорту, системы технического обслуживания которых не связаны между собой. В этом варианте для регулярной эксплуатации ЭП требуется создание собственной инфраструктуры, включающей специальный порт, систему причалов для остановок в промежуточных пунктах на трассе.

При формировании транспортных систем на базе ЭП их основными пунктами базирования можно считать речные и морские порты. И это объяснимо: с одной стороны они являются местами отправки пассажиров и грузов, а с другой, как правило, имеют в своей структуре ремонтные базы. Основные требования к оборудованию трасс для движения ЭП и пунктам их базирования приведены в работах [2, 6].

При организации скоростных транспортных систем на базе ЭП необходимо использовать накопленный отечественный и зарубежный опыт эксплуатации СПК и СВП различного назначения [2, 3, 8]. Анализ опыта эксплуатации скоростных судов позволял сформулировать следующие технико-эксплуатационные требования к ЭП: лётные характеристики разрабатываются по классам Российского Речного Регистра

или Российского морского Регистра судоходства; базирование осуществляется на специальных береговых площадках; амфибийность предусматривает выход на береговую площадку, старт-посадку с воды, грунта, снега и льда; погрузка-выгрузка осуществляется с носа, кормы и с бортов (крыльев); швартовка на воде – носом, бортом или кормой к причалу или борту судна; транспортировка к месту эксплуатации – железнодорожным или автомобильным транспортом, или при возможности, в «самолетном» режиме. Требования к силовым установкам ЭП подробно изложены в монографии [7]. Упомянутые технико-эксплуатационные требования должны учитываться при разработке проектов перспективных типов ЭП [2].

Анализ современного состояния и тенденции развития скоростных транспортных судов показывает на необходимость создания, прежде всего, новых типов пассажирских ЭП. Сравнение их технико-эксплуатационных характеристик с другими типами скоростных судов показывает, что ЭП имеют ряд неоспоримых преимуществ и позволяют значительно расширить сферы действия водного транспорта.

В целом масштабный ряд типоразмеров перспективных транспортных ЭП можно разделить на три группы. Первая – речные такси и экспрессы пассажировместимостью 10–30 человек (грузоподъемность 1–3 т). Вторая – речные и морские экспрессы пассажировместимостью 40–150 человек (грузоподъемность 4–20 т). Третья – морские паромы пассажировместимостью 200–500 человек (грузоподъемность 20–60 т) [4].

Область использования ЭП должна формироваться исходя из их скоростных и мореходных качеств. Новые высокоскоростные средства могут эффективно использоваться в качестве пассажирских судов на магистральных реках Сибири и Дальнего Востока и на трассах Балтийского, Черного, Японского и других морей. Примеры таких проектов известны. Для повышения эффективности работы скоростного флота по заданию Ленского объединенного речного пароходства в 1993 году АО «ЦКБ по СПК имени Р.Е. Алексеева» разработало эскизные проекты ЭП класса «О» – «Вилюй» (пассажировместимость 80 чел.), «Алдан» (50 чел.) и «Витим» (30 чел.). Упомянутые суда имели эксплуатационную скорость 240–300 км/ч. Дальность плавания по запасам топлива – от 500 до 1500 км. Анализ показал, что ЭП с упомянутыми характеристиками позволяют увеличить протяженность линий в течение светового дня в 2–3 раза и, главное, при необходимости организовать зимнюю эксплуатацию этих судов [1].

Ещё один пример использования транспортных ЭП. На берегах Балтийского моря расположены десятки портов многих государств. С помощью ЭП они могут быть соединены напрямую, без пересечения многочисленных сухопутных границ. В качестве перспективных могут рассматриваться линии: Санкт – Петербург – Хельсинки (протяженность 304 км), Санкт – Петербург – Стокгольм (800 км), Санкт – Петербург – Калининград (1100 км). В принципе, использование ЭП позволяет превратить трассы Балтийского моря в своеобразные улицы большого города, на которых работают морские «маршрутные такси». По аналогии с СПК «Ракета» и «Метеор» пассажировместимость ЭП может быть кратной 20…40 мест. Для смешанных скоростных перевозок пассажиров на автобусах и ЭП, пассажировместимость новых судов должна учитывать типы автобусов, используемых на линии [4].

В качестве реального шага в решении задачи по использованию ЭП на Балтике Ассоциацией разработчиков, производителей и потребителей экранопланов выполнены проектные проработки речных и морских ЭП типа «Орион» пассажировместимостью 12–150 чел. Выполненные расчеты показывают, что использование ЭП типа «Орион-40» (рис.1) позволит доставлять пассажиров из Санкт – Петербурга в Хельсинки за 1,5 часа, в Стокгольм – за 3,5 часа, в Калининград – за 4,5 часа. ЭП типа «Орион-40» может обеспечить мореходность до 3-х баллов (высота волны 1,25 м) и регулярность рейсов до 80% в течение года [5].

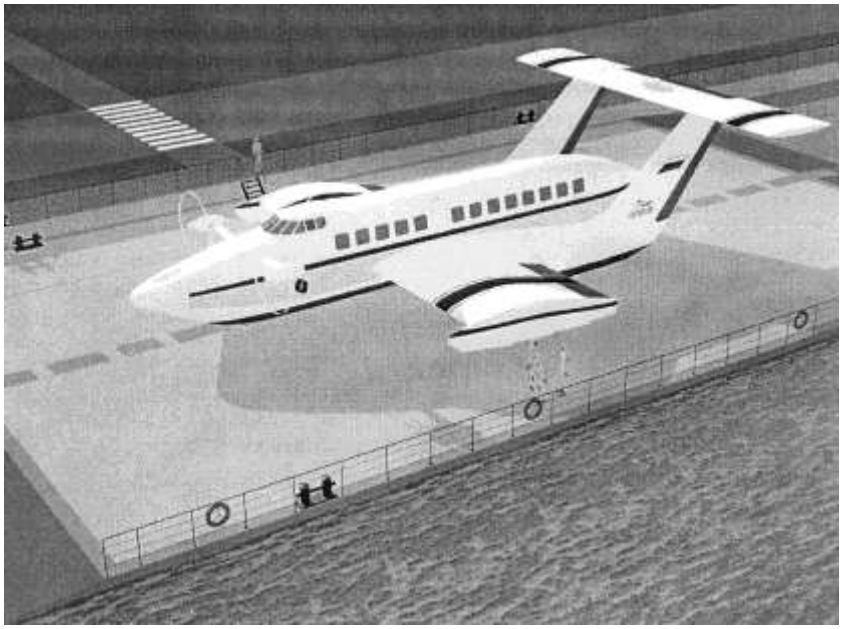


Рис.1. Морской пассажирский экраноплан «Орион-40» на посадочном понтон-причале.

Список литературы

[1] Панченков А.Н., Драчев П.Т., Любимов В.И. Экспертиза экранопланов. – Н. Новгород: Поволжье, 2006. – 656 с.
[2] Клементьев А.Н., Любимов В.И., Васильев Э.В. Экранопланы. Часть 2. Особенности аэродинамики. Технико-эксплуатационные характеристики. Современные концепции использования: учеб. пособие. – Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2005. – 42 с.
[3] Любимов В.И., Васильев Э.В. Транспортные экранопланы внутреннего плавания и особенности их технического обслуживания // Сб. науч. ст. «Проектирование транспортных судов внутреннего плавания» / Труды ВГАВТ. Вып. 300. Н. Новгород, 2001. – С. 47–61.
[4] Любимов В.И., Гаккель А.А., Барышев В.И. Мы не плаваем, а летаем! – девиз компании «Элиен». – Н. Новгород: Поволжье, 2007. – 68 с.
[5] Любимов В.И., Гаккель А.А., Барышев В.И. Методологические основы комплексного обоснования характеристик пассажирских экранопланов // Вестник ВГАВТ. Вып.22. Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2007. – С. 51–54.
[6] Антипович А.А., Святенко А.В. Грузопассажирские трассы для экранопланов и безопасность их эксплуатации // Сб. науч. ст. «Авиационная техника». Вып.2. Казань, 2001. – С. 20–23.
[7] Химич В.Л., Чернигин Ю.П. Проектирование силовых установок экранопланов. – СПб.: Судостроение, 2011. – 496 с.
[8] Маскалик А.И., Нагапетян Р.А. и др. Экранопланы – транспортные суда XXI века. – СПб.: Судостроение, 2005. – 547 с.

MODERN CONCEPTS AND PROSPECTIVE AREAS OF USING TRANSPORT AIRFOIL BOATS

V.I. Lubimov, U.G.Varakosov, V.I. Baryshev

Modern concepts of using airfoil boats in transport systems as well as technical and operational requirements for new vessels are considered. Examples of prospective areas of using airfoil boats are presented.

УДК 629.5

Н.В. Огнев, *аспирант, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
Е.Г. Бурмистров, *д. т. н., проф., ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СЕКЦИЙ

Излагаются особенности проектирования транспортировочных платформ для перевозки крупных сборочных единиц корпусов судов на отечественных судостроительных верфях. Рассматриваются основные мировые тенденции в области проектирования подобной оснастки. Описываются общие подходы к проектированию транспортировочных платформ с использованием технологий 3D-моделирования.

В целях сокращения стапельного периода, снижения трудоёмкости сборочно-сварочных работ на построечном месте и общей стоимости постройки судов, современные технологии их постройки предполагают изготовление сборочных единиц корпуса с максимально возможными массо-габаритными характеристиками. В то же время отечественные судостроительные верфи, спроектированные и построенные в середине XX века, как правило, имеют серьёзные ограничения не только по годовой программе судостроения и массе перерабатываемого металла, но и по грузоподъёмности кранового и напольного транспортного оборудования, высоте и ширине пролётов, размерам вывозных ворот, радиусам поворота транспортных средств и т.д.

Кроме того, изготовление крупногабаритных секций сопряжено с рядом трудностей и в организации производства: серьёзно изменяются схемы размещения производственных участков и сборочно-сварочной оснастки, усложняются схемы строповок узлов и секций, увеличивается трудоёмкость погрузоразгрузочных работ, затрудняется выполнение операций кантовки полотнища (или готовой секции), что приводит к усложнению производственного процесса в целом.

Основными путями выхода из сложившейся ситуации представляются следующие:

- реконструкция существующих судокорпусных цехов;
- проектирование и постройка новых цехов с учётом всей совокупности современных производственных факторов;
- изготовление принципиально новой технологической оснастки взамен морально и физически устаревшей, которая позволила бы значительно повысить эффективность использования существующего (не заменяемого) технологического оборудования и производства в целом.

Первые два пути требуют значительных капитальных затрат, что делает маловероятным их реализацию, особенно в условиях непрекращающихся экономических кризисов, нестабильной загрузки и неграмотного менеджмента верфей. Единственным реальным путём для большинства отечественных верфей является третий путь развития. Он, при относительно небольших затратах открывает возможности для существенного увеличения производительность труда, повышения культуры производства и улучшения качества выпускаемой продукции.

Проблема транспортировки крупногабаритных секций, а именно: погрузка их на транспортёр, перемещение в цехе и по территории верфи, разгрузка, складирование…, на сегодняшний день является одной из наиболее острых. Для транспортировки секций на отечественных верфях широко применяется рельсовый транспорт: самоходные внутрицеховые тележки и не самоходные платформы, буксируемые тепловозами. Первые в основном используют как межпролётные транспортные средства в

поперечных транспортных системах цехов и, благодаря значительной грузоподъёмности имеют определённые преимущества перед безрельсовым транспортом. Применение же вторых сегодня малоэффективно по ряду причин, как то:

- отсутствие манёвренности (возможно движение только по рельсам);
- высокая стоимость обслуживания рельсовых путей;
- значительная себестоимость транспортировки сборочных единиц.

Мировые тенденции в области создания специальных транспортных средств для судостроения указывают на актуальность применения специализированных безрельсовых платформ для транспортировки секций по территории завода. Такие платформы позволяют значительно повысить культуру перевозок, уменьшить потери и повысить сохранность перевозимых сборочных единиц, уровень механизации погрузочно-разгрузочных работ, производительность труда такелажников и строповщиков.

В силу ориентации мировых производителей подобного оборудования, прежде всего на морское судостроение, где превалирует блочное формирование корпуса на открытом стапеле, массы сборочных единиц составляют от 50 т и выше см. рис.1, рынок специализированных транспортировочных платформ для судостроения широко представлен крупнотоннажными платформами с минимальной грузоподъёмностью 50 тон (см. рис. 1 и 2). В то же время сегмент мало-и среднетонажных транспортировочных платформ для судостроения практически не заполнен. В отечественном судостроении, например, для транспортировки секций массой от 3 до 20 т используются переоборудованные колёсные транспортные средства, выпускаемые отечественной же промышленностью для бизнеса и сельского хозяйства. Подобные решения позволяют, что называется «выйти из ситуации» но не решают проблему в целом.

Рис. 1. Многоосная несамоходная тяжелонагруженная транспортировочная платформа г/п 2000 т

Рис. 2. Многоосная самоходная тяжелонагруженная транспортная платформа г/п 500 т

Для проектирования специальной транспортной оснастки применительно к конкретной верфи необходим набор следующих исходных данных:

1) расстояние и время транспортировки;
2) условия транспортировки;
3) минимально необходимые размеры проезжей части;
4) минимально необходимый размер радиуса поворота;
5) массогабаритные характеристики транспортируемых секций:
6) тип транспортируемых секций;
7) способ погрузки секций и их выгрузки.

Расстояние транспортировки определяет минимально необходимую скорость передвижения транспортировочной платформы с грузом. Оно зависит от количества выпускаемых секций, такта и ритма их изготовления, интенсивности сборки корпуса на построечном месте.

Под условиями транспортировки здесь понимается тип и качество дорожного покрытия, в свою очередь, определяющие требования, предъявляемые к шасси проектируемой транспортировочной платформы, главным образом с точки зрения обеспечения устойчивости платформы с грузом при маневрировании.

Минимально необходимые размеры проезжей части и радиусов поворотов накладывают ограничения на максимальные габаритные размеры шасси платформы, углы поворота колёс, их ширину, клиренс и проч.

Массогабаритные характеристики транспортируемых секций определяют минимально необходимые размеры опорной платформы транспортного средства и её конструктивное оформление.

Тип перевозимых секций определяет количество и тип необходимой крепёжной оснастки на транспортировочной платформе.

Условия погрузки и выгрузки перевозимых секций определяют ряд принципиальных конструктивных решений, применяемых при проектировании транспортировочных платформ, например, наличие погрузоразгрузочного устройства, его грузоподъёмность, вылет стрелы манипулятора, способ управления им и т.д.

Техническое задание на проектирование необходимо составлять с учётом исходных данных из числа перечисленных, которые в свою очередь, должны быть продиктованы производственными возможностями верфи, генеральным планом предприятия и схемой размещения производства. На стадии эскизного проекта по проектируемому объекту необходимо отразить все концептуальные идеи, принципиальные решения по которым впоследствии могут стать объектами конструкторской мысли на стадиях разработки технического проекта, разработки ведомостей заказной и рабочей конструкторской документации. Таким образом, на стадии эскизного проектирования необходимо определиться по следующему кругу вопросов:

а) проектная грузоподъёмность платформы;

б) её маневренность;

в) тип перевозимых секций;

г) степень универсализации платформы (возможность транспортировки секций различных типов, массы и габаритов);

д) способ передвижения (самоходное, несамоходное (буксируемое));

е) тип шасси (колесное, гусеничное, электромагнитное, на воздушной подушке);

ж) функциональность (только транспортировка; самостоятельная погрузка и транспортировка; самостоятельная погрузка, транспортировка, разгрузка; перевозка и самостоятельная разгрузка);

з) способ управления транспортировочной платформой (прямое, дистанционное);

и) степень автоматизации платформы (наличие центровочного устройства, автоматических сигнализаторов перегрузки и несимметричной погрузки и проч.).

Полезно также проанализировать технические возможности имеющихся на верфи транспортных средств, на предмет возможности их модернизации. При этом следует исходить из того, что существующие транспортные платформы, как правило, ряд существенных недостатков, как то:

- низкий показатель маневренности;
- отсутствие погрузо-разгрузочных устройств;
- низкий уровень автоматизации и механизации;
- отсутствие центрирующих устройств и автоматизированных систем контроля центра тяжести перевозимого груза;
- низкий уровень безопасности транспортных и погрузо-разгрузочных операций;
- ограничение габаритов транспортируемых секций габаритами платформы.

Полезным, прежде всего с точки зрения корректности составления технического задания, может оказаться изучение опыта проектирования транспортных средств для транспортировки крупногабаритных домостроительных конструкций, например железобетонных панелей, плит перекрытий и т.д. Размеры последних, как правило, значи-

тельно превышают ширину опорной поверхности транспортировочной платформы (см. рис. 3 и 4). Здесь весьма положительно зарекомендовал себя вариант размещения перевозимой панели наклонно с опиранием на продольную вертикальную опору. Это позволяет уменьшить суммарный негабарит перевозимого груза. Однако и в этих случаях необходимо, практически «в ручном режиме», обеспечивать симметричную загрузку панелевозов в целях сохранения центра тяжести транспортного средства с грузом на линии оси симметрии.

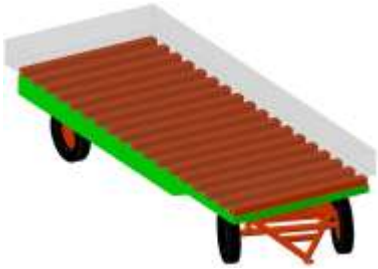


Рис. 3. Двухосная несамоходная транспортировочная платформа с передней поворотной осью

Рис. 4. Двухосная несамоходная транспортировочная платформа с передней поворотной осью для транспортировки домостроительных панелей

Выполнить это условие можно оснастив транспортное средство гидравлическим центрующим устройством (см. рис. 5) и системой автоматической подцентровки платформы.

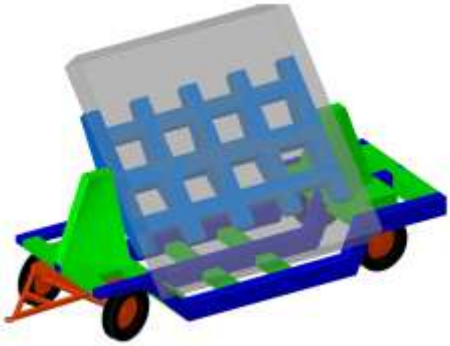


Рис. 5. Концептуальная модель двухосной несамоходной транспортировочной платформы с передней поворотной осью, оснащённой наклонной платформой с центрирующим устройством

Таким образом, транспортировочная платформа с передней поворотной осью, оснащённая наклонной платформой с центрирующим устройством позволит транспортировать секции с большей габаритной шириной по сравнению с существующими аналогами. Кроме того, в этом случае в основном будут решены вопросы безопасности транспортировки груза на относительно большие расстояния за счёт дополнительной фиксации груза как к собственно платформе, так и к раме.

Недостатком предложенного решения является невозможность самостоятельной погрузки-разгрузки перевозимых секций. Как правило, для этих целей требуется цеховое или стапельное крановое оборудование, рабочие-строповщики, увеличивается время оборота платформы и т.д.

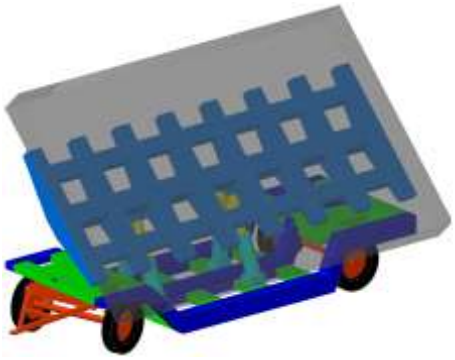


Рис. 6. Концептуальная модель двухосной несамоходной транспортировочной платформы с передней поворотной осью, оснащённой подъёмной наклонной платформой с центрирующим устройством и специальным погрузо-разгрузочным устройством

Поэтому, в качестве альтернативы можно предложить концептуальную модель двухосной несамоходной транспортировочной платформы с передней поворотной осью и наклонной платформой с центрирующим устройством, оснащённую специальным погрузо-разгрузочным устройством (см. рис 6). Данная концепция позволит самостоятельно осуществлять погрузку крупногабаритных секций непосредственно с опорных тумб в сборочно-сварочном цехе без применения цехового кранового оборудования, транспортировать их к месту сборки в блоки или непосредственно на стапель, и разгружать их аналогичным способом, также без применения крановых средств.

На рис. 7 и 8 показаны основные этапы практического применения подобной транспортировочной платформы. В частности, на рис. 7 показано как платформа в положении «по походному» (рама-платформа в горизонтальном положении, гидравлика отключена) заводится под секцию, назначенную для транспортировки и находящуюся опорных тумбах. После включения гидравлической системы рама-платформа поднимается до касания секции. Автоматическое центрующее устройство оценивает правильность погрузки секции с точки зрения расположения её центра тяжести. В случае необходимости следует сигнал в систему управления гидравликой рамы-платформы для её подцентровки (корректировки положения). После описанных процедур секция на раме-платформе приподнимается над опорным тумбами и перемещается в таком положении за пределы погрузочной площадки. На заключительном этапе секция фиксируется к раме-платформе с помощью штатной системы крепления, переводится в наклонное положения (транспортное состояние) и в таком положении транспортируется к месту блочной или стапельной сборки. Разгрузка платформы производится в обратной последовательности.

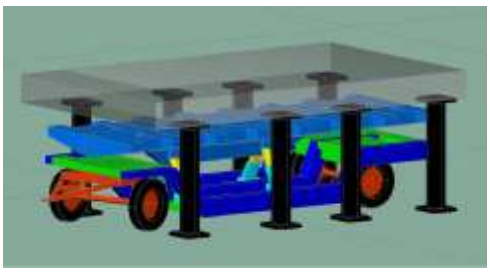


Рис. 7. Заведение транспортировочной платформы под секцию, установленную на опорных тумбах

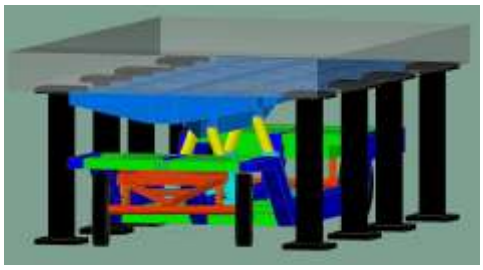


Рис. 8. Установка секции на раму платформу после включения гидравлической системы

Таким образом, применение подобных транспортных средств на существующих верфях способно:

1) обеспечить дальнейшую эксплуатацию существующих сборочно-сварочных и стапельных цехов с имеющимися размерами пролётов и вывозных ворот;

2) сохранить (продлить) существующие варианты схем размещения производства на верфях;

3) реализовать общемировые тенденции, направленные на увеличение массы и габаритов изготавливаемых секций;

4) уменьшить трудоёмкость погрузо-разгрузочных и транспортных работ;

5) повысить их безопасность.

Список литературы

[1] We move the world into motion! http://www.kamag.com/en.html.
[2] Сырков Л.К. Справочник по технологическому проектированию судостроительных верфей и цехов. – Л.: Судостроение, 1980. – 204 с.
[3] Галкин В.А. Справочник по сборочно-сварочной оснастке цехов верфи. – Л.: Судостроение, 1993. – 304 с.

PARTICULARS OF DESIGNING TOOLING EQUIPMENT FOR TRANSPORTING LARGE SIZED SECTIONS

N.V. Ognev, E.G. Burmistrov

The particulars of designing transportation platforms for moving large-sized assembly units of ship hulls at domestic shipyards are presented. Major world tendencies are considered in the area of designing such tooling equipment. General approaches are described to designing transportation platforms using 3d modeling technologies.

УДК 629.5.081: 681.51

Н.В. Огнев, *аспирант ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
Д.А. Галочкин*, аспирант ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
Е.Г. Бурмистров, *д. т. н., проф. ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
Россия: 603950, г. Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 5А.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ СХЕМ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ВЕРФЯХ

Рассматривается влияние производственных, технологических и конструктивных факторов на схемы размещения производства. Даются рекомендации по технологической подготовке и организации производства в цехах верфи. На примере верфи-представителя излагается логико-логистический подход к оптимизации схем движения материальных потоков верфи.

Организация судостроительного производства представляет собой сложную логико-логистическую задачу. Сложность её решения, как правило, характеризуется трудностями трассировки маршрутов движения материальных потоков и необходимости их согласования и взаимоувязки более чем по десяти видам производств.

Современный этап развития технологии судостроения характеризуется непрерыв-

ным совершенствованием технологических процессов постройки судов, в частности, переносом значительного объёма работ с построечных мест (стапелей) в специализированные цехи. Данное обстоятельство обусловлено стремлением судостроителей к максимальному предварительному укрупнению и насыщению сборочных единиц корпусов судов, унификации элементов отделки судовых помещений, насыщению их элементами систем, оборудованием и механизмами. Такая тенденция к сборке судов из комплексно насыщенных секций и блоков приводит к значительному усложнению координации работ различных цехов верфи практически на всех этапах производственного цикла.

Каждый вид производства, как правило, реализуется в отдельном цехе (или пролёте цеха), характеризуется большой номенклатурой изготавливаемой продукции и учитывает влияние ряда производственных, конструктивных и технологических факторов. К лимитирующим производственным факторам относят: габариты пролётов цехов, высота до подкрановых путей, грузоподъёмность кранового оборудования, размеры ввозных и вывозных ворот цеха, габариты и грузоподъёмность напольных транспортных средств, годовая программа и серийность постройки судов. Влияние конструктивных факторов обычно ограничивается главными размерениями корпуса судна, принятой системой набора, расположением в корпусе фундаментов, люков и вырезов. Технологические факторы включают влияние габаритов применяемого листового и профильного проката, условия сборки и сварки секций (блоков) в цехах и корпуса на стапеле, производительность технологического оборудования, вид и способ сварки, технологические методы и способы выполнения всех видов работ.

Наряду с влиянием изложенных факторов, выбор оптимальных схем материальных потоков верфи определяется методом постройки судна, технологическими особенностями технологических процессов по основным видам производств, формами организации труда, распределением основных видов работ между специализированными цехами и стапелем; степенью предварительного насыщения секций, процентом нарастания технической готовности судна как функции от времени, распределением работ между основными производственными подразделениями верфи, размещением строящихся судов на построечных местах.

Основные особенности оптимизации схем материальных потоков современной судостроительной верфи наиболее удобно рассмотреть на примере одного из действующих предприятий отрасли, имеющего с одной стороны значительную годовую программу судостроения и с другой – ограниченные производственные возможности.

Анализ особенностей организации производства верфи-представителя (как и большинства отечественных судостроительных верфей) показывает, что они напрямую определяются перечисленными выше факторами. Однако, каждая верфь имеет и свои (уникальные) особенности. Так, рассматриваемая верфь-представитель имеет почти 100-летнюю историю. Вполне естественно, что за истекший период достижения научно-технического прогресса многократно вынуждали руководство верфи к изменениям в организации схем хранения и транспортировки материалов, заготовок и полуфабрикатов, изменению технологических планировок цехов и производственных участков, корректировки систем коммуникаций... Как правило, подобная «перестройка» верфи была ориентирована на решение сиюминутных задач, связанных с постройкой судов конкретных типов и назначения. Выполнение заказов по строительству судов других проектов требовали очередной корректировки генплана и организации производства на верфи. В результате к настоящему времени верфь-представитель обрела весьма сложную и разветвлённую структуру цехов, отдельные производственные участки которых оказались удалены друг от друга на значительные (до 200 м) расстояния, а их производственные возможности и пропускная способность отличаются более чем в 3 раза. Всё это значительно усложняет внутрицеховую структуру управления и значительно снижает общую управляемость верфи.

На сегодняшний день на верфи параллельно ведутся работы по строительству, ремонту и модернизации стальных судов. Кроме того осуществляется большая программа строительства железобетонных и композитных несамоходных судов. Совмещение столь разных по назначению и технологическому обеспечению производств на территории одной верфи требует логико-логистического подхода к организации маршрутов материальных потоков на его территории. Такой подход требует, в частности, выявления «узких мест» в организации производства и компоновки генплана верфи. Для верфи-представителя такими «узкими местами» являются:

1) размещение производств металлического и железобетонного судостроения в пределах одного цеха или даже одного пролёта;

2) суммарная мощность грузоподъёмного оборудования не соответствует пропускной способности вывозных ворот;

3) существенное различие грузоподъёмности стапельного кранового оборудования 80 и 36 т и ограниченность зон их действия;

4) значительные различия размеров вывозных ворот в пролётах сборочно-сварочных цехов по ширине от 3,5 м до 8,5 м и по высоте от 5,0 м до 9,0 м;

5) относительно большая протяжённость и сложность транспортного пути от корпусообрабатывающего участка судокорпусного цеха до сборочно-сварочного цеха;

6) удалённость достроечного цеха от цехов предварительной сборки и от стапеля.

Учитывая перечисленные особенности верфи-представителя, а также связанные с этим особенности технологической подготовки производства, для оптимизации схем движения материальных потоков данной верфи можно рекомендовать ряд мероприятий. В частности:

1. Локализацию изготовления секций различных типоразмеров на различных производственных участках сборочно-сварочного и судокорпусного цехов.

2. Организацию на горизонтальной части слипа двух участков блочной сборки, для формирования сборочных единиц массой до 65 и 80 т.

3. Внутрицеховое разделение материальных потоков разных типов судов вплоть до выделения производств в отдельные пролёты цехов.

4. Концентрацию в инженерно-достроечном цехе верфи максимального объёма достроечных работ с возможностью размещения частных видов производства в отдельных помещениях, дополнительно оснащённых подъёмно-транспортным и фильтро-вентиляционным оборудованием.

С учётом изложенного, авторами разработана схема маршрутов материальных потоков верфи-представителя, представленная на рис. 1.

Принятые при разработке данной схемы решения основаны на концепции прерывно-поточного производства и позволяют уже на этапе подготовки и организации производства в основных цехах верфи уменьшить неупорядоченность, разнообразие и неопределённость в движении предметов труда в пространстве и во времени. Например, только соблюдение однонаправленности движения предметов труда в производстве обеспечивает:

а) многократное уменьшение сложности производственной системы в целом и трудоёмкости управления производством благодаря сокращению в несколько раз протяжённости межцеховых и внутрицеховых технологических маршрутов и производственных связей между участками;

б) создание единой базы для согласования сроков выполнения работ с непрерывной загрузкой плановых рабочих мест и производственных участков;

в) повышение технологической однородности работ на каждом рабочем месте с их специализацией и т.д.;

г) возможность одновременного нахождения сборочных единиц разной номенклатуры на различных позициях (производственных участках) общего производственного потока и не требует (в рамках допустимых значений) принудительного выравнивания производственных циклов их изготовления.

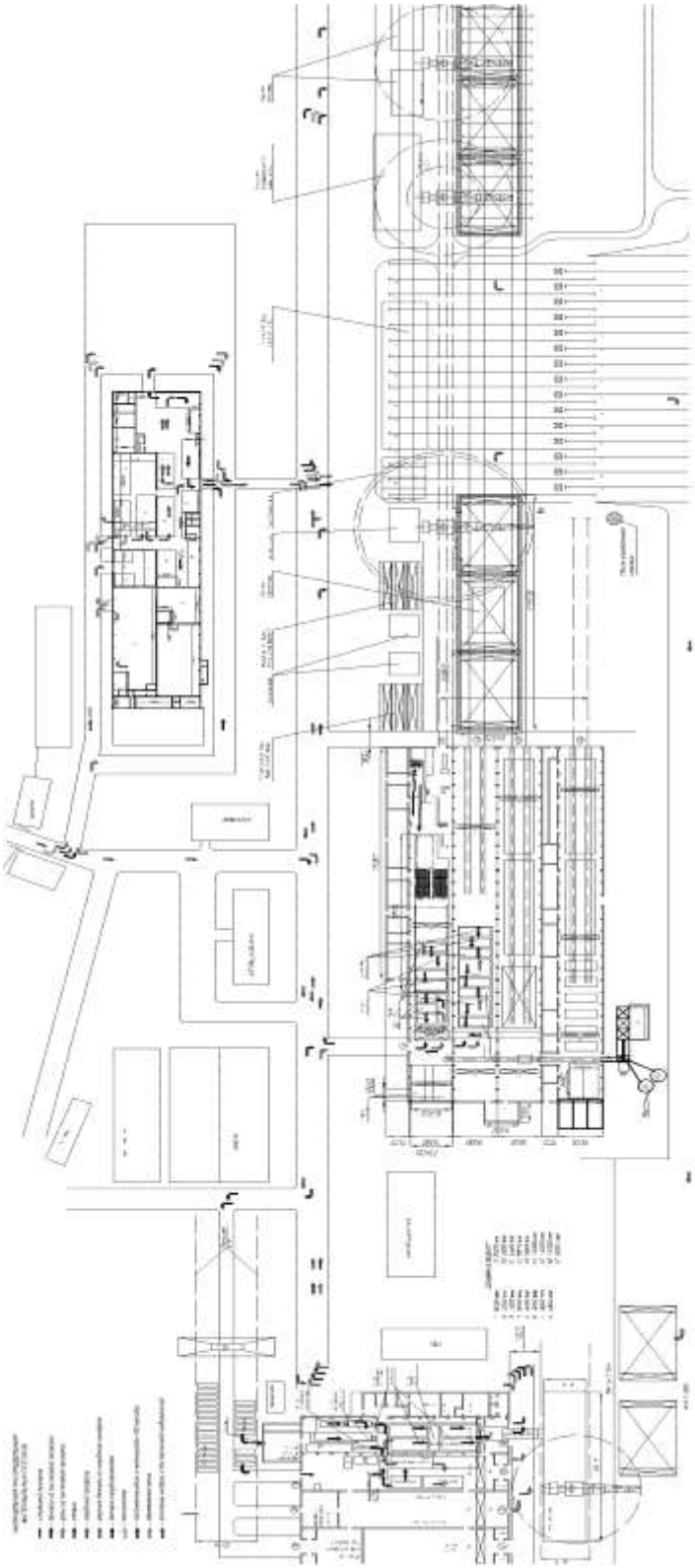


Рис. 1. Схема маршрутов материальных потоков верфи-представителя, разработанная на основе логико-логистического подхода

В приведённой схеме упорядоченное движение деталей и сборочных единиц обеспечивается: стандартизацией и типизацией межцеховых и внутрицеховых технологических маршрутов; оптимизацией типовой схемы движения предметов труда в производстве. Обеспечение же синхронизации производственных циклов в смежных производствах, а также прямоточности и однонаправленности движения предметов труда достигнуты за счёт проектных и технологических решений и обоснования потребного количества рабочих мест и единиц технологического оборудования. Дополнительную адаптацию верфи-представителя к изменениям внешних и внутренних условий, заложенную в схеме на рис. 1, может обеспечить также «гибкость» применяемых техники и технологий, уровень компетентности и профессионализма кадров, гибкость управления производством.

Список литературы

[1] Клячко Л.М. Перспективы развития отечественного судостроения: проблемы и решения / Л.М. Клячко // Журн. Судостроение. – 2005, №4. – С. 70 – 74.
[2] Нарусбаев А.А. Концепция судостроительного предприятия будущего // Журн. Судостроение. – 1986. №2. – С. 39 – 43.
[3] Прогнозирование развития технологии судостроения. Основные положения. – Л.: Судостроение, 1990. – 125 с.
[4] Логистика: учебник для вузов / под ред. Б.А. Аникина: 2-е изд., перераб. И дополн. – М.: ИНФРА-М, 2001. – 352 с. ISBN 5-16-000536-6.
[5] Кулик Ю.Г. Логистика процессов сборочно-сварочного производства в судостроении: учеб. Пособие / Ю.Г. Кулик, Е.Г. Бурмистров. – Н.Новгород: ИПК ФГОУ ВПО «ВГАВТ»; 2004. – 112 с.
[6] Баженов Н.Д. Технология постройки судов. Ч. 5. Проектирование корпусных цехов: справ. Матер. / Н.Д. Баженов, Ю.В. Горбунов, Е.Г. Бурмистров. – Н.Новгород: ИПК ФГОУ ВПО «ВГАВТ»; 2003. – 108 с.

SOME PARTICULARS OF OPTIMIZING MATERIAL FLOWS AT DOMESTIC SHIPYARDS

N.V. Ognev, D.A. Galochkin, E.G. Burmistrov

The impact of production, technology and construction factors on production location schemes is considered. Recommendations are given on technology preparation and production organization in shipyard shops. A representative shipyard serves as an example for presenting a logical and logistics approach to material flow movement scheme of shipyard.

УДК 629.5.081: 681.51

***О.А. Паутова**, инженер-технолог ОАО «Гидромаш».*
***Е.Г. Бурмистров,** д.т.н., проф.ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 5А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ВЕРФИ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА

В статье рассмотрены основные методологические подходы к повышению организованности, управляемости и эффективности функционирования производственных систем судостроительных верфей. Изложены основные методы моделирования производственных систем. Приведён алгоритм построения имитационной модели размещения основного производства верфи.

Современные промышленные предприятия и научно-производственные комплексы, научно-исследовательские и опытно-конструкторские центры вынуждены функционировать в условиях жёсткой конкуренции. Внедрение на предприятиях современных технологий производства, повышение его технического уровня, нестабильность цен на энергоносители и транспортировку материалов, полуфабрикатов, комплектующих, готовых изделий, а так же открытый рынок дешёвой рабочей силы способствуют этому.

Поэтому при формировании как стратегических, так и многих тактических и оперативных решений менеджмент предприятия вынужден учитывать многочисленные, нередко взаимно противоречивые соображения и опираться на сложные критерии эффективности путей достижения конечных целей. Быстрому принятию эффективных решений способствует применение различных методов моделирования процедур управления предприятием.

С быстрым развитием ЭВМ и соответствующего программного обеспечения повышается значимость имитационного моделирования. Если для классических математических методов исследования тех или иных управленческих решений и управляемых объектов было необходимо некоторое (иногда весьма значительное) время для разработки модели и её решения, то сейчас появилась возможность оперативного анализа конкретной производственной ситуации и генерации для неё оптимального решения за счёт выбора управленческих процедур в широком диапазоне изменения входных переменных имитационной модели. Как правило, они допускают наличие «графической оболочки». Это ещё более ускоряет процесс обработки информации и принятия решений.

Основным методологическим подходом к повышению организованности, управляемости и эффективности функционирования производственных систем (ПС) служит жёсткое соблюдение следующих трёх принципов организации современных производств: синхронизация, оптимизация, интеграция. Главным «инструментом» такого подхода является анализ и синтез ПС. *Анализ* ПС позволяет выявить наиболее существенные факторы, дать им характеристику, количественную оценку взаимодействия факторов друг с другом, определить влияние их на параметры системы. *Синтез* обеспечивается в процессе разработки формализованных моделей технологии и расчёта их параметров.

При традиционной системе управления ПС стремятся обеспечить минимум издержек в каждом из звеньев материального потока. Более эффективным, на наш

взгляд, представляется обеспечение оптимальности всей совокупности элементов ПС. Наглядно это можно представить в записи целевых функций:

▫ при традиционном управлении:
$$L(C) = \min C_{\text{С}} + \min C_{\text{П}} + \min C_{\text{Т}}; \quad (1)$$

▫ при оптимальном управлении:
$$L(C) = \min\left(C_{\text{С}}^{\text{опт}} + C_{\text{П}}^{\text{опт}} + C_{\text{Т}}^{\text{опт}}\right), \quad (2)$$

где $C, C_{\text{С}}, C_{\text{П}}, C_{\text{Т}}$ – суммарные затраты и затраты соответственно на снабжение, производство и транспортировку материалов, полуфабрикатов, комплектующих и т.д.;

$C_{\text{С}}^{\text{опт}}, C_{\text{П}}^{\text{опт}}, C_{\text{Т}}^{\text{опт}}$ – оптимальные значения каждого из слагаемых.

В целом управляющие процедуры должны обеспечить решение следующих производственных вопросов:

- что и в каком объёме производить;
- как следует разместить производственные участки;
- как осуществить выбор средств технологического оснащения (СТО);
- как осуществлять производственно-календарное планирование;
- как осуществлять выбор структуры внутрипроизводственной транспортной системы;
- как осуществлять контроль за ходом производственных процессов;
- как создать систему промежуточного складирования?

Концепция такого управления, рассматривающая все материальные и информационные потоки в ПС как единое целое, основывается на проверенных практикой методах и моделях. К числу таких методов можно отнести логистическую оптимизацию управленческих решений. Ряд авторов считают, что для целей логистической оптимизации применим, например, критерий оптимальности В. Парето, который позволяет определить влияние решений по конкретному объекту на улучшение общего состояния системы [1]. Оптимизация при этом основывается на следующей совокупности исходных положений:

1) сложная ПС имеет ряд подсистем;

2) каждая подсистема обладает собственным критерием оптимальности;

3) взаимодействие подсистем является экономическим взаимодействием, целью которого является обеспечение наилучшего сочетания показателей отдельных подсистем и ПС в целом.

Сущность логистической оптимизации по Парето заключается в следующем [2]. ПС, состоящая из множества допустимых вариантов подсистем, выражается целевой функцией:

$$\begin{aligned} &L(x) = [l_1(x_1)...l_m(x_m)]; \\ &L(x) \to \min; \\ &x = (x_1...x_m) \in X, \end{aligned} \quad (3)$$

где приняты следующие обозначения:

m – количество подсистем ПС;

$k = \overline{1,m}$ – совокупность подсистем;

$x=(x_1...x_m)$ – вариант экономического поведения ПС;

$l_k = f(x_k)$ – целевая функция k-й подсистемы;

X – множество допустимых вариантов экономического поведения ПС в целом, состоящих из композиции допустимых вариантов подсистем и удовлетворяющих дополнительным общим ограничениям ПС.

Решение задачи векторной оптимизации ПС позволяет находить эффективные варианты её экономического поведения: допустимое решение $x'=(x_1'...x_m')$, которому соответствует вектор значений целевых функций подсистем $c'=(c_1'...c_m')$, является эффективным, если не существует другого допустимого решения $x=(x_1...x_m)$, которому отвечает вектор $c=(c_1...c_m)$ такой, что

$$C_k < C_k' \text{ для всех } k=\overline{1,m} \text{ и } \sum_{k=1}^{m} C_k < \sum_{k=1}^{m} C_k'. \quad (4)$$

Эффективное решение x' совокупности подсистем – это такой случай, когда достигнут минимум суммарных затрат, при котором ни одна из подсистем не может минимизировать свои локальные издержки, не ухудшая показатели хотя бы одной из остальных подсистем («хорошо делать так, чтобы кому-нибудь стало лучше, если при этом другому не становится хуже» [3]).

На рис. 1 изображён пример оптимизации по Парето для ПС, состоящей из двух подсистем. Линия *AB* на рисунке отображает множество значений целевых функций; C_1 и C_2 – значения целевых функций подсистем при их изолированном функционировании. При совместном функционировании необходимо получить значения итоговых целевых функций системы не хуже, чем C_1 и C_2, т.е. решение необходимо искать на участке *DE*; все решения, лежащие левее C_1D_1 (для подсистемы I) и ниже C_2E (для подсистемы II) неприемлемы. Практически это означает, что концепция логистической оптимизации ПС ведёт к интеграции входящих в неё подсистем.

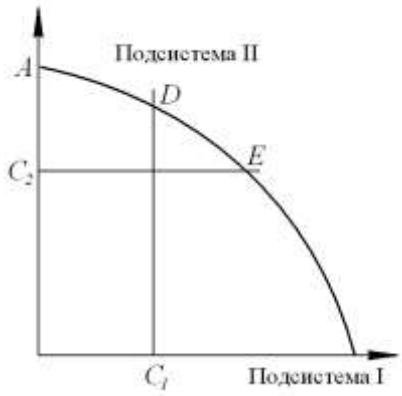


Рис. 1. Граница оптимальных решений по В. Парето

Отмеченное можно легко формализовать известными методами моделирования: математическими, статистическими, экономико-математическими, физическими, натурными, имитационными.

При *математическом моделировании* разрабатывается математический «эквивалент» системы, процесса, объекта (или их совокупности), отражающий их основные свойства. Моделироваться могут любые системы, процессы и объекты, поддающиеся математическому описанию.

Этот метод имеет широкую область применения. Однако, зачастую достаточно сложно построить модель, особенно сложной ПС, адекватно учитывающую влияние всех возможных производственных и непроизводственных факторов.

При *статистическом моделировании* разрабатываемая модель основывается на выявленных статистических закономерностях. Моделированию хорошо поддаются процессы, по которым можно собрать массив статистических данных. При наличии качественных данных метод точен и, при использовании специализированного про-

граммного обеспечения, достаточно прост в применении. Однако, имеются серьёзные ограничения по объёму и требуемой надёжности статистических данных.

Экономико-математическое моделирование применимо в основном для решения чисто экономических задач и даёт возможность с заданной точностью смоделировать поведение экономической подсистемы предприятия.

Физическое (экспериментальное) моделирование основано на физическом подобии уменьшенной в размерах модели реальной ПС. Используется при невозможности применения аналитических методов моделирования или воспроизведения модели в натуральную величину. В этом состоит его основное преимущество. Однако, метод может дать надёжные результаты лишь при точном соблюдении физического подобия модели.

При *натурном моделировании* моделью является материально или мысленно представляемый объект, в достаточной степени повторяющий свойства, существенные для реального моделируемого объекта. Применяется в основном при тестировании созданных моделей. Затраты на создание таких моделей могут быть весьма высокими.

Имитационное моделирование представляет собой метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему. С этой моделью проводятся эксперименты (имитация), целью которых является получение возможно полной информации о реальной системе. К имитационному моделированию прибегают, когда: дорого или невозможно экспериментировать с реальной системой или объектом, невозможно построить аналитическую модель (например, когда в ПС имеются не чёткие причинно-следственные связи, трудно прогнозируемые последствия, нелинейности, стохастические (случайные) переменные и т.д.), необходимо сымитировать поведение системы во времени.

Преимуществами имитационного моделирования являются: относительно низкие стоимость модели и время её разработки, возможность многократного повторения (проигрывания) одних и тех же производственных эпизодов, достаточно высокая точность, наглядность и универсальность.

В связи с очевидными достоинствами данного метода, применение его для практических целей, связанных с оптимизацией организационно-технологических схем размещения производства, представляется наиболее целесообразным, так как комплексно позволяет решить следующие вопросы:

1) формирование плана производства на долгосрочную перспективу;

2) оценка потребности в производственных мощностях под будущий прогноз востребованности той или иной выпускаемой продукции;

3) выявление узких мест в производственной цепочке;

4) определение потребности в производственном персонале по участкам;

5) выявление влияния сезонных факторов на загрузку мощностей;

6) создание сбалансированного производственного потока;

7) определение благоприятных периодов для технического обслуживания и ремонтов оборудования.

Собственно моделирование выполняется на основе описания производственного процесса, включающего в себя технологический маршрут и состав изделий, а так же спецификаций. Информация о технологических маршрутах необходима для моделирования потока технологических операций по участкам и единицам оборудования, а состав изделий необходим для расчёта потребности в материалах и оценки бюджета предприятия. Теоретически и маршруты и спецификации могут быть описаны укрупнёнными показателями и включать только «критические» операции и элементы изделий. Кроме того, значительные трудности при создании имитационной модели, могут быть связаны с выбором основного и вспомогательного оборудования. В этой связи

при разработке соответствующих алгоритмов необходимо предусматривать специальные блоки выбора СТО из каталогов, баз данных, Internet-предложений и проч.

Оценка оптимального значения управляемого параметра моделирования определяется на основании анализа всего моделируемого процесса и зависит от точности выбора или формулировки целевой функции на всей исследуемой области управляемых параметров. В связи с этим решаются задачи определения стационарных характеристик управляемого регенерирующего процесса.

В настоящее время значительное количество методов получения оценок по результатам имитационного эксперимента предполагает стационарность наблюдаемого процесса, для чего, как правило, необходимо отбрасывать переходный период. Например, метод повторных независимых реализаций даёт «независимые» реализации средних значений. Однако при генерации траекторий оптимизации каждый раз необходимо отсекать переходный период, что приводит к значительным затратам машинного времени. Более предпочтительны методы, когда оценки вычисляются на основании обработки одной выборочной траектории. Переходный режим в этом случае моделируется всего один раз. Однако в этих методах требуется оценивать корреляцию между получаемыми данными.

В первом случае генерируется *N* выборочных траекторий процесса $\xi(t)$ с отсечением переходного режима. Получают *N* последовательностей длины *k*.

$$(\hat{Y}_1^i, \hat{Y}_2^I, ...\hat{Y}_k^i),\ i = \overline{1}, \overline{N}\,. \tag{5}$$

Каждая реализация даёт одно независимое среднее $\hat{Y}^i$. Общая оценка среднего получается по всем реализациям $\hat{Y}^i$. При этом оценка имеет приближенно нормальное распределение, что позволяет вычислить её дисперсию.

«Независимые» отрезки реализации получаются следующим образом. Вся траектория разбивается на *N* серий. Длительность каждой равна *k*. После этого вычисляется коэффициент серийной корреляции:

$$\hat{r} = (\hat{r}^i, \hat{r}^{i+1}) = \frac{\sum_{j=1}^{k} \frac{j}{k}\hat{r}_j + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{j}{k}\hat{r}_{2k-1}}{2(j = \sum_{j=1}^{k} \frac{k-j}{k}\hat{r}_j) + 1}, \tag{6}$$

где $\hat{r}_j$ – коэффициент корреляции между $\hat{Y}$ и $\hat{Y}^{i+j}$ стационарного процесса.

При увеличении длины серии *k* коэффициент корреляции уменьшается. Поэтому при достаточно больших *k* им можно пренебречь и получить дисперсию оценки в предположении независимости *N* выборочных средних.

Во втором случае (метод оценивания сериальной корреляции) эксперимент не сводится к последовательности независимых испытаний. Оценка автокорреляционной функции используется для получения дисперсии оценки:

$$\sigma^2(\hat{Y}) = \frac{1}{N}\left\{\hat{R}_0 + 2\sum_{i=1}^{N-1}(1 - \frac{i}{N})\hat{R}_j\right\},$$
$$\hat{R}_i = \frac{1}{N-1}\sum(\hat{Y}_j - \hat{Y})(\hat{Y}_{j+i} - \hat{Y}),\ i = 0, N-1. \tag{7}$$

В этом методе используются все наблюдения, но для получения оценок требуемой точности необходимо вычислять величины, входящие в выражение (6), что требует дополнительных вычислительных затрат. Однако такой метод позволяет определять дисперсию оценок и в случае нестационарных процессов, и поэтому может быть использован для анализа характеристик оценок, полученных без отсечения переходного режима.

Во всех описанных выше процедурах требуется отсекать переходный период. Единственный метод, учитывающий всю входящую информацию – это регенеративный метод. Случайный процесс $\xi(t)$, характеризующий, например, нестабильную загрузку верфи, является регенерирующим, если существуют такие случайные моменты времени, в которых он начинается заново в вероятностном смысле. При этом он каждый раз попадает в определённую точку фазового пространства (точку регенерации). Особенностью этого процесса является то, что «отрезки» процесса, заключённые между моментами регенерации являются вероятностными копиями друг друга. Это даёт возможность получать на каждом интервале регенерации независимые оценки:

$$\hat{Y} = \frac{\xi}{\Delta T};\ \xi = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\xi_i\ ;\ \Delta T = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\Delta T_i \qquad (8)$$

где $\xi_i = \int_{T_{i-1}}^{T_i}\hat{\xi}(t)dt$ – интегральная оценка исследуемого процесса;

N – число циклов регенерации;

$\Delta T = T_i - T_j$ – длительность *i*-го цикла регенерации.

Если зависимая и независимая переменные количественны и непрерывны, то для решения задачи поиска оптимума можно использовать, например, методику поверхности отклика. Так как универсального метода параметрического синтеза не существует, то очевидно, что идти надо всё же по пути создания банков моделей и процедур, применение каждой из которых определяется спецификой решаемой задачи.

Создание имитационной модели, как правило, является многоэтапным процессом. Однако всегда, не зависимо от общего количества этапов, в первую очередь разрабатывается блок-схема модели в предположении, что: изменения управляемых параметров осуществляются в моменты регенерации модели; а число циклов регенерации конечно (последнее уменьшает погрешность).

С учётом изложенного на рис. 2. представлен вариант алгоритма построения имитационной модели организации и размещения основного производства верфи в программной среде Plant Simulation.

Фрагмент разработанной на базе приведённого на рис. 2 алгоритма имитационной модели размещения производства по изготовлению деталей корпуса судна на ОАО «Судоремонтно-судостроительная корпорация» (г. Городец) представлен рис. 3.

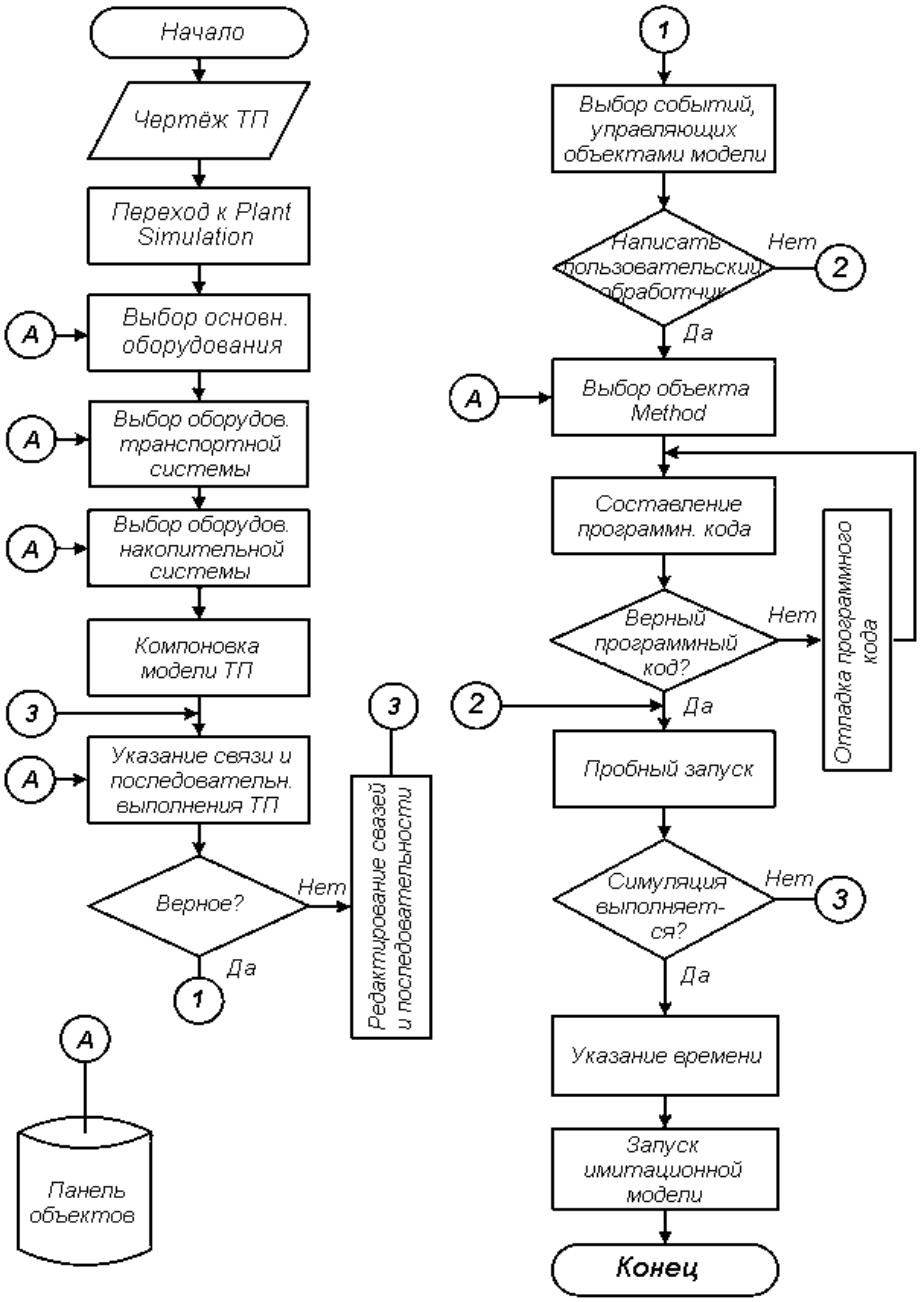


Рис. 2. Алгоритм построения имитационной модели размещения основного производства верфи

Результаты имитационного моделирования по данному алгоритму являются динамическими. Это позволяет выполнять моделирование производственных потоков, варьируя его входные и выходные параметры и существующие производственные ограничения. Таким образом, становится возможным оценивать различные сценарии развития конкретных производственных ситуаций и опробовать соответствующие меры реагирования на них. Немаловажным является и тот факт, что результаты моделирования можно визуализировать.

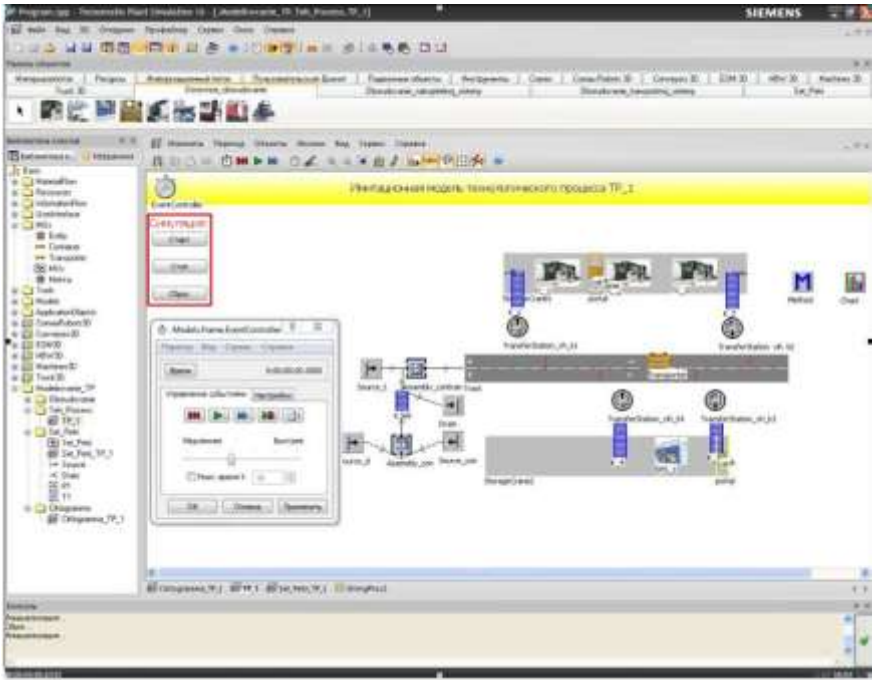


Рис. 3. Фрагмент имитационной модели размещения производства

Взаимодействие с прототипом в такой модели, как правило, полностью интерактивно. С помощью простых действий можно выполнить различные манипуляции с моделью – отключать оборудование, увеличивать его мощность, изменять производственную программу, объём выпуска изделий, уровень эффективности производства, степень загрузки оборудования, сменность работ и многое другое.

Список литературы:

[1] Новиков О.А. Логистика: Учебное пособие / О.А. Новиков, С.А. Уваров. – СПб.: «Изд. дом «Бизнес-пресса», 1999. – 280 с.
[2] Логистика: Учебник / под ред. Б.А. Аникина: 2-е издание, перераб. и доп.– М.: ИНФРА-М, 2001. – 340 с.
[3] Кулик Ю.Г., Бурмистров Е.Г. Логистика процессов сборочно-сварочного производства в судостроении: Учебное пособие / Ю.Г. Кулик, Е.Г. Бурмистров. – Н. Новгород: Издательство ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2004. – 112 с.

SHIPYARD PRODUCTION SYSTEM MODELING WITH OPTIMIZATION OF ORGANIZATION AND TECHNOLOGY SCHEME OF PRODUCTION LOCATION

O.A. Pautova, E.G. Burmistrov

The article deals with major methodological approaches to increasing organization, manageability and efficiency of functioning of shipyard production systems. Major methods of production systems modeling are presented. An algorithm of constructing the imitation model of shipyard major production location is given.

УДК 629.12.001.2

Е.П. Роннов, *д.т.н., проф., ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

ВМЕСТИМОСТЬ СУХОГРУЗНОГО СУДНА ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ

Получены выражения для расчета объема грузовых помещений судов внутреннего плавания и размеров их основных отсеков корпуса, что позволяет в уравнении грузовместимости учесть влияние оптимизируемых параметров судна.

Уравнение вместимости является одним из основных в теории проектирования и, как правило, входит в число ограничений при решении задач оптимизации элементов и характеристик судна. Оно отражает баланс теоретической вместимости корпуса, надстроек и рубок и объемов, необходимых для размещения груза, оборудования, механизмов, запасов и т.д., обеспечивающих возможность использования судна в соответствии с его назначением

$$\sum W \geq \sum W \tag{1}$$

Принципы составления уравнения вместимости судов различных типов подробно рассмотрены и изложены в ряде работ В.В. Ашика, Л.М. Ногида, А.В. Бронникова и др. Л.М. Ногидом введено уравнение для сухогрузных судов, базирующееся на рассмотрении вместимости грузовых помещений [1]. Грузовместимость будет обеспечена, если выполняется условие

$$W_{\text{тр}} \geq W_{\text{г}}, \tag{2}$$

где $W_{\text{тр}}$ – объем грузовых помещений (трюмов);
$W_{\text{г}}$ – объем, необходимый для размещения заданного количества груза.

Решая эти уравнения можно получить главные размерения, необходимые для обеспечения вместимости. Уравнение (2) позволяет получить более компактное решение, требующее меньшее количество исходной информации, что бывает важно для начальных стадий проектирования. Зная род груза и его удельный нагрузочный объем, определение величины $W_{\text{г}}$ не вызывает затруднений. Аналитическое представление объема грузовых трюмов в функции от элементов судна имеет тесную связь с его архитектурно-конструктивным типом. Так для сухогрузов со средним расположением машинного отделения получено [1]

$$W_{\text{тр}} = \left(\delta_{\text{пп}} k_{\text{гм}} - \delta_{\text{м}} \frac{L_{\text{м}}}{L} \right) LB\left(H - H_{\text{вд}}\right), \tag{3}$$

где
$\delta_{\text{пп}}$ – коэффициент полноты теоретического объема грузовых помещений;
$k_{\text{гм}}$ – коэффициент, учитывающий объемы пиков, цистерн, коридора гребного вала;
$\delta_{\text{м}}$, $L_{\text{м}}$ – коэффициент полноты и длина машинного отделения;
L, B, H – длина, ширина и высота борта судна;
$H_{\text{вд}}$ – высота двойного дна.

Подавляющее большинство судов имеют кормовое расположение машинного отделения. Полезная грузовместимость таких судов может быть рассчитана [2]

$$W_{тр} = k_г \delta_{пп} L_г B(H - H_{вд}), \quad (4)$$

где
$k_г$ – коэффициент заполнения трюмов;
$L_г$ – длина грузовых помещений.

В практике проектирования судов внутреннего плавания, имеющих в соответствии с [5] вторые борта и второе дно, и кормовое расположение машинного отделения, объем грузовых трюмов определяют по выражению [3]

$$W_{тр} = (1 - \zeta)\delta_{тр}\lambda_т(1 - \chi_т)LBH, \quad (5)$$

где
ζ – коэффициент, учитывающий заполнение трюмов, а также проходы, трапы и прочие места в трюме, не занятые грузом;
$\chi_н$ – коэффициент потери объема на набор, двойные борта и двойное дно и представляющий собой отношение объема, занятого набором либо двойным дном и двойными бортами к теоретическому объему трюма;
$\lambda_т$ – относительная длина трюма;
$\delta_{тр}$ – коэффициент полноты корпуса судна в районе грузовых трюмов.

Выражением типа (5) удобно пользоваться при наличии близкого прототипа, по которому можно принять относительную длину трюма

$$\lambda_т = \frac{L_г}{L} \quad (6)$$

и коэффициент потери объема $\chi_н$ и полноты корпуса $\delta_{тр}$.

При решении оптимизационных задач такой подход является неприемлемым, так как варьируемые параметры и, прежде всего отношение длины к ширине судна, могут привести к существенному отличию действительных значений $\lambda_т$ и $\chi_н$ от принятых по прототипу. Необходимо либо установить их зависимость от варьируемых величин, либо иметь возможность непосредственного определения объемов, которые они характеризуют. Кроме этого, при расчете вместимости, целесообразно учитывать дополнительный объем грузовых трюмов, создаваемый комингсами люковых вырезов. Учет этой дополнительной вместимости судов внутреннего плавания, имеющих известные ограничения по габаритам, становится актуальным, поскольку она в относительном виде составляет значительную величину и может достигать в среднем не менее $20 \div 25\%$ от грузового объема трюма. Тогда выражение (5), с учетом сказанного, можно записать

$$W_{тр} = (1 - \zeta)\delta_{тр} L_г (B - 2B_б)(H - H_{вд}) + l_л h_к b_л, \quad (7)$$

где
$B_б$ – средняя ширина бортового отсека;
$l_л$, $b_л$ – длина и ширина люкового выреза;
$h_к$ – высота комингса грузового трюма.

На стадии исследовательского проектирования наибольшую трудность в определении элементов судна, входящих в выражение (7), составляют коэффициент полноты $\delta_{тр}$ и длина грузовых помещений $L_г$. Что касается первого, то при существующей тенденции и требованиях [5] по обеспечению формы трюма в виде прямоугольного параллелепипеда, коэффициент $\delta_{тр}$ мало зависит от варьируемых параметров при оптимизации элементов судна и может быть рассчитан по выражению

$$\delta_{\text{тр}} = \delta + \Delta\delta,$$

где
$\Delta\delta$ – надбавка к коэффициенту полноты; для морских грузовых судов $\Delta\delta = 0{,}1$; для судов внутреннего плавания $\Delta\delta = 0{,}14$.

Длину грузовых помещений можно найти

$$L_{\text{г}} = L - L_{\text{мо}} - L_{\text{ф}} - L_{\text{а}} - L_{\text{п}}, \tag{8}$$

где
$L_{\text{мо}}$ – длина машинного отделения;
$L_{\text{ф}}$ – длина форпика;
$L_{\text{а}}$ – длина ахтерпика;
$L_{\text{п}}$ – длина прочих отсеков.

К прочим отсекам сухогрузного судна будем относить некоторые, иногда предусматриваемые по конструктивным соображениям, дополнительные отсеки средней части корпуса, такие как коффердам между машинным отделением и грузовыми трюмами, диптанки между отдельными трюмами. Такие отсеки свойственны судам с люковыми закрытиями. Величина $L_{\text{п}}$ может быть задана в абсолютном виде по данным судна-прототипа либо учтена с помощью коэффициента $k_{\text{п}}$, характеризующего отношение $L_{\text{п}}$ к суммарной длине грузовых помещений. Тогда выражение (8) примет вид

$$L_{\text{г}} = \left(L - L_{\text{мо}} - L_{\text{ф}} - L_{\text{а}}\right)\left(1 + \kappa_{\text{п}}\right)^{-1}. \tag{9}$$

Строго говоря, на судах в оконечностях кроме форпика иногда выделяются некоторые дополнительные отсеки. Так, например, при наличии подруливающего устройства за форпиком располагается соответствующий отсек. В ряде случаев такой отсек предусматривается и при отсутствии подруливающего устройства из условия выделения участка палубы для размещения механизмов привода и самих люковых крышек, а так же исходя из требований [5] к максимально допустимой величине подпалубных "карманов" и форме грузовых трюмов. В некоторых случаях предусматривается отсек между румпельным и машинным отделениями, который используется для размещения различных цистерн, кладовых и т.п. Наличие этих отсеков, их размеры, обуславливается комплексом причин, ряд из которых могут рассматриваться как аргументы при определении параметров фор – и ахтерпика. Это позволяет при последующем анализе их объединять с пиками.

Рассмотрим определение длины грузового отсека, занимаемого грузовыми трюмами. Для этого изложим способ нахождения размеров основных отсеков корпуса сухогрузного судна с кормовым расположением надстройки и машинного отделения.

Площадь машинного отделения обуславливается условиями размещения в нем главных и вспомогательных двигателей, прочего оборудования и может быть оценена в зависимости от мощности энергетической установки судна. Машинное отделение простирается от борта до борта, то есть ширина его может рассматриваться как величина заданная. Поэтому можно предполагать о наличии зависимости длины машинного отделения от мощности главных двигателей. Анализ статистических данных (табл. 1) позволил принять в качестве функции относительную длину машинного отделения, определяемую по выражению

$$l_{\text{м}} = \left(L_{\text{мо}} B\right)^{0{,}5}. \tag{10}$$

Таблица 1

Характеристики судов внутреннего плавания

Номер проекта	N, кВт	L, м	B, м	δ	α	L/B	$l_м$	$l_ф$	l_a
890	165	42,0	7,5	0,815	0,853	5,6	7,0	1,27	0,77
765	220	62,0	9,2	0,885	0,81	6,7	8,1	1,26	0,64
912	330	61,5	9,0	0,817	0,887	6,83	9,2	1,17	0,49
27-410	310	66,5	8,2	0,862	0,924	8,11	8,7	1,11	0,54
1000/540	397	61,3	12,0	0,824	0,868	5,11	10,7	0,9	0,42
Р86А	440	78,0	15,0	0,878	0,969	5,2	10,4	1,05	0,55
Р25	588	85,0	12,5	0,836	0,902	6,8	11,6	1,20	0,57
559Б	588	79,9	15,0	0,797	0,871	5,33	9,9	1,1	0,69
869	662	57,0	7,0	0,75	–	8,1	8,9	1,35	0,66
936	772	83,7	11,0	0,794	0,891	7,61	11,91	1,0	0,63
21-88	772	100	12,2	0,818	0,903	8,2	12,8	1,28	0,62
576	735	90,0	13,0	0,837	0,902	6,92	12,9	1,0	0,41
Р25Б	850	96,0	12,5	0,84	0,903	7,68	10,2	1,49	0,58
326	883	78,1	11,6	0,833	0,92	6,73	12,0	1,02	0,37
1557	970	114	13,2	0,818	0,891	8,064	14,5	1,82	0,53
Р32	970	96,6	14,8	0,823	0,890	6,53	15,4	1,11	0,46
2-95	1030	110	13,0	0,825	0,904	8,46	14,6	1,35	0,34
1743	1030	105	14,8	0,827	0,88	7,1	14,5	1,22	0,52
488/А	1280	112,5	13,0	0,85	–	8,65	14,7	1,83	0,46
613	1280	90,2	13,0	0,76	0,85	6,94	15,3	1,0	0,4
1565	1320	135	16,5	0,851	0,935	8,18	15,5	1,52	0,4
1577	1470	128,6	16,5	0,845	0,902	7,79	16,3	1,58	0,33

Статистическая зависимость $l_м$ от мощности энергетической установки (рис. 1) имеет вид

$$l_м = aN^{0,4}, \tag{11}$$

где
N – мощность главных двигателей, кВт;
a – эмпирический коэффициент.

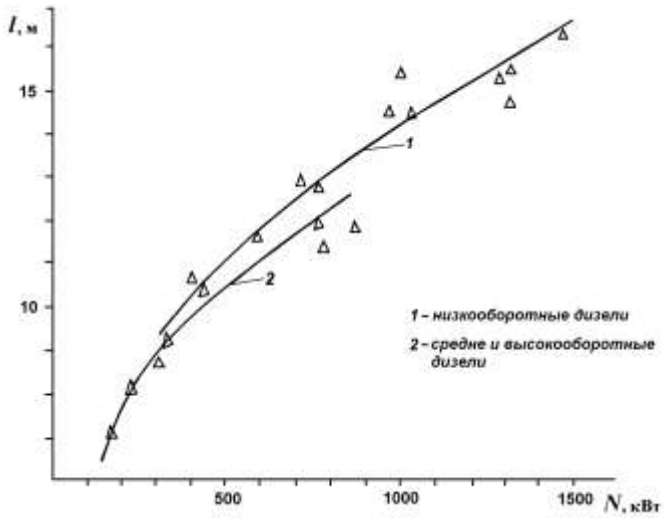


Рис. 1. Зависимость относительной длины машинного отделения от мощности главных двигателей

Тогда длина машинного отделения будет

$$L_{\text{мо}} = \frac{l_{\text{м}}^2}{B} k_в \,. \tag{12}$$

Величину коэффициента *a* рекомендуется принимать следующим образом:

– при использовании в качестве главных двигателей низкооборотных дизелей $a = 0{,}9$;

– при использовании в качестве главных двигателей среднеоборотных дизелей $a = 0{,}8$.

Коэффициент $k_{\text{в}}$ учитывает вальность судовой энергетической установки. Принимается равным $k_{\text{в}} = 1$ для одно- и двухвальных и $k_{\text{в}} = 0{,}7$ для трехвальных СЭУ.

Одновременно надо иметь ввиду, что диапазон применения низкооборотных дизелей на речных сухогрузных судах по мощности обычно соответствует $N \geq 310$ кВт, средне и высокооборотных – при $N \leq 880$ кВт.

Длина форпика в соответствии с требованиями [4] должна быть не менее половины ширины судна. Как отмечалось выше, между форпиком и носовым трюмом иногда предусматривается дополнительный отсек. Суммарная длина этого отсека и форпика в относительном виде по статистическим данным колеблется

$$l_{\text{ф}} = \frac{2L_{\text{ф}}}{B} = 1 \div 1{,}83 \,. \tag{13}$$

Учитывая конструктивные особенности судов рассматриваемого типа для начальных стадий проектирования можно рекомендовать следующие значения относительной длины самого форпика (рис. 2).

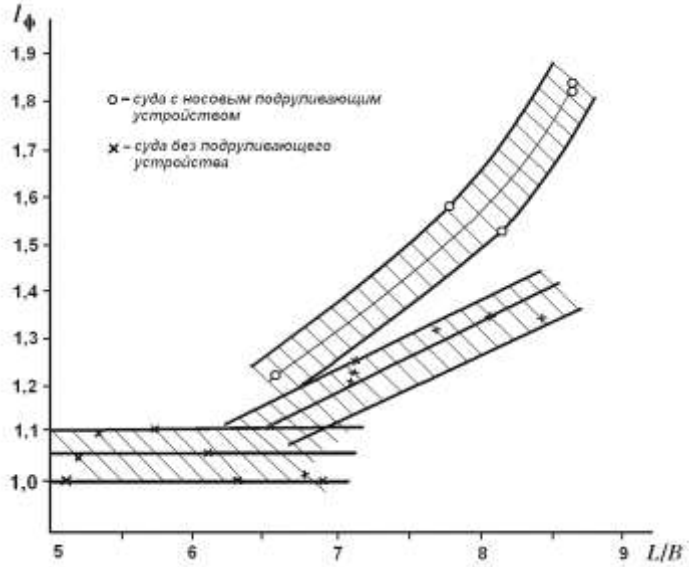


Рис. 2. Зависимость относительной длины форпика от отношения *L/B*

$$l_{\text{ф}} = \begin{cases} 1 \div 1{,}1 & \text{если } \dfrac{L}{B} \leq 6{,}9 \\ 0{,}15\dfrac{L}{B} + 0{,}125 & \text{если } \dfrac{L}{B} > 6{,}9 \end{cases} . \tag{14}$$

Если на судне предусматривается подруливающее устройство, то в рассмотренном диапазоне отношений *L/B* относительную длину форпика плюс отсека для размещения подруливающего устройства можно рассчитать по выражению

$$l_{ф} = 8{,}5 \cdot 10^{-0{,}2} \left(\frac{L}{B} \right)^{1{,}4}. \qquad (15)$$

В последние годы на речном флоте стали появляться суда с носовым расположением надстройки. Не анализируя причины, приводящие к такому архитектурно – конструктивному решению, что выходит за рамки данной работы, приведем выражение, которое можно использовать для расчета суммарной длины носовых отсеков – форпика и отсека под надстройкой

$$L_{фн} = B \left(\frac{l_{ф}}{2} + 1 \right). \qquad (16)$$

Длина ахтерпика Правилами [4] не нормируется и принимается исходя из удовлетворения требований конструктивного характера. При этом учитываются условия не только использования его как румпельного отделения. На размерах ахтерпика могут сказаться требования общепроектного характера, такие как форма кормовой оконечности судна, размещение двигателей, движительно-рулевого комплекса, других механизмов и оборудования в смежных отсеках. Поэтому представляется логичным определять длину ахтерпика в зависимости от коэффициентов формы корпуса, размеров машинного отделения и отношения *L/B*, характеризующего как управляемость судна, а, следовательно, и габариты рулевого устройства, так и условия его размещения в отсеке, т.е.

$$L_{а} = f\left(\frac{L}{B}, l_{м}, \alpha, \delta \right),$$

где

α – коэффициент полноты КВЛ;

δ – коэффициент полноты водоизмещения.

В соответствии с теорией размерности этот функционал можно записать в следующем виде

$$\frac{L_{а}}{\sqrt{L_{мо} B}} = f\left(\frac{L}{B}, \alpha, \delta \right).$$

Используя аппарат многофакторного анализа и приведенные выше статистические данные, получена зависимость

$$L_{а} = 0{,}38 l_{м} \delta^{-2{,}63} \alpha^{0{,}78} \left(\frac{L}{B} \right)^{-0{,}107}. \qquad (17)$$

Для судна с одинарными бортами выражение (7) для полной вместимости по тарно-штучным грузам будет иметь вид

$$W_{тр} = (1-\zeta)\delta_{тр}(1-\chi_{н})(H - H_{вд}) L_{г} B + l_{л} b_{л} h_{к}. \qquad (18)$$

В случае перевозки части груза не только в трюме, но и на люковых крышках, либо в виде, например, штабеля леса, располагаемого выше уровня комингсов люковых вырезов, тогда в формулах (7) и (18) необходимо учесть этот дополнительный объем

$$W_{тр} = (1-\zeta)\delta_{тр} L_{г} (B - 2B_{б})(H - H_{вд}) + l_{к} b_{л} h_{к} + l_{ш} b_{ш} h_{ш},$$

где

$l_{ш}$, $b_{ш}$, $h_{ш}$ – длина, ширина и высота штабеля груза, размещаемого на люковых крышках, либо выше уровня комингсов люковых вырезов.

Коэффициент $\chi_н$, учитывающий потери объема на вторые борта и второе дно, по статистическим данным составляет в среднем 0,35±0,02. Таким образом, полученные статистические зависимости и коэффициенты позволяют определить длину и вместимость грузовых помещений, учитывая при этом функциональную зависимость этих величин от основных варьируемых параметров задачи оптимизации элементов судна.

Список литературы

[1] Ногид А.М. Теория проектирования судов. – Л.: Судпромгиз, 1955. – 480 с.
[2] Ашик В.В. Проектирование судов. – Л.: Судостроение, 1975.– 350 с.
[3] Вицинский В.В., Страхов А.П. Основы проектирования судов внутреннего плавания. – Л.: Судостроение, 1970. – 450 с.
[4] Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания. Том 2. М.: Транспорт, – 251 с.
[5] Требования к грузовым судам речного флота МРФ РСФСР по обеспечению их ускоренной погрузки и выгрузки. – Л. 1975 МРФ РСФСР, ЛИВТ, – 12 с.

CARGO CAPACITY OF INLAND WATERWAY BULK CARGO VESSEL

E.P. Ronnov

Formulae for calculating the volume of cargo rooms of inland waterway vessels and for calculating dimensions of major hull compartments of such vessels have been obtained, which helps in a cargo capacity equation to take into account the impact of optimized vessel parameters.

УДК 629.12.071.5:629.124.6

Е.П.Роннов, *д.т.н.,проф.,ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
В.В. Анисимова, *аспирант, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А

РАСЧЕТ НАГРУЗКИ МАСС ОБСТАНОВОЧНЫХ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ

В статье проанализирована нагрузка масс обстановочных судов внутреннего плавания. Приведены результаты корреляционно-регрессионного анализа обоснования вида модуля, необходимого для нахождения каждой из составляющих нагрузки масс. Получены статистические зависимости измерителя массы от оптимального модуля.

На начальной стадии проектирования массу судна определяют приближенными методами, основанными на применении формул, в состав которых входят коэффициенты относительной массы (измеритель), а также элементы и характеристики судна (модуль). Величина каждой из составляющих нагрузки масс может быть представлена в следующем виде [1]:

$$P_i = \psi_i \cdot M_i, \tag{1}$$

где ψ_i, M_i – измеритель и модуль i-ой составляющей нагрузки масс.

С целью получения статистических зависимостей для нахождения измерителя массы и обоснованного выбора вида модуля, был произведен анализ нагрузки масс обстановочных судов внутреннего плавания. В связи с тем, что количество проектов обстановочных судов ограниченно, к анализу некоторых составляющих нагрузки, существенно не зависящих от назначения судна, привлечены соразмерные им буксиры и толкачи со схожими характеристиками. Элементы и характеристики рассматриваемых судов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Элементы и характеристики судов

Проекты	L,м	B,м	H,м	T,м	δ	D,т	V,м/с	N,кВт	$n_{эк}$
306	23,05	11	2,2	0,57	0,557	80,53	3,47	66,24	9
908	27,5	7,5	2,7	1,26	0,559	145,2	5	331,2	-
878	18	3,85	1,4	0,6	0,758	31,5	4,17	110,4	4
391А	24,2	3,7	1,4	0,82	0,577	42,4	5,39	110,4	6
391Б	24,2	3,7	1,4	0,82	0,577	42,36	5,56	110	6
Р-96А	19,9	5	1,4	0,55	0,864	47,3	4,58	220,8	6
796	29	6,5	2,5	1,5	0,421	119	5,28	441,6	-
911	27,4	6,6	1,8	0,9	0,649	105,7	4,22	220,8	-
1741	31	8	2,7	1,3	0,651	210	5,28	441,6	-
Р-162	24,8	9	1,1	0,7	0,822	128,5	4,22	331,2	7
Р121	32,55	5,5	2,6	1,4	0,507	127	6,67	331,2	10
809	21	5,2	1,3	0,7	0,657	50,2	-	-	-
911В	27,4	6,6	1,8	0,9	0,754	122,7	-	-	-
81350	24	7,2	1,4	0,71	0,823	100,92	4,44	220	7
81240	27,55	4,45	1,6	1	0,604	74,07	5,56	103,04	6
81240А	27,55	4,45	1,6	0,94	0,587	67,64	5,56	139,84	4
3050	21,8	3,5	1,2	0,67	0,767	35,44	4,24	85	3
3050.1	24,95	4,00	1,5	0,98	0,702	58,85	5,43	205,9	6
3052	33,56	5,5	2,6	1,4	0,563	116,9	6,67	411,8	6
SV2407	23,63	6,84	2,75	1,5	0,516	95,84	6,11	522	6

Составляющие нагрузки масс представлены в соответствии с СТП 1.15-85, так как массы анализируемых судов рассчитаны в соответствии с этим стандартом. Таким образом, массу судна порожнем можно записать в следующем виде:

$$D_П = P_K + P_M + P_{C,T/П} + P_{ЭР} + P_{зап} + P_{св} + \Delta D, \qquad (2)$$

где P_K – масса раздела «Корпус»;

P_M – масса раздела «Механизмы»;

$P_{C,T/П}$ – масса раздела «Системы и трубопроводы»;

$P_{ЭР}$ – масса раздела «Электрооборудование и радиооборудование»;

$P_{зап}$ – заполнение механизмов, систем и трубопроводов;

$P_{св}$ – сварные швы;

ΔD – запас водоизмещения.

В свою очередь, массу корпуса представляем как сумму масс групп, составляющих раздел «Корпус»

$$P_K = P_{MK} + P_{ДК} + P_{ОБ.П} + P_{ОКР} + P_{ДВ} + P_{СУ} + P_{ПМ} + P_{СН.И}, \quad (3)$$

где P_{MK} – масса группы «Металлический корпус и надстройки»;

$P_{ДК}$ – масса группы «Дерево в составе корпуса и надстроек»;

$P_{ОБ.П}$ – масса группы «Оборудование помещений»;

$P_{ОКР}$ – масса группы «Окраска, цементировка, изоляция и покрытия»;

$P_{ДВ}$ – масса группы «Дельные вещи»;

$P_{СУ}$ – масса группы «Судовые устройства»;

$P_{ПМ}$ – масса группы «Палубные механизмы»;

$P_{СН.И}$ – масса группы «Снабжение и инвентарь».

Модуль для расчета составляющей нагрузки масс судна обычно выбирают исходя из логики взаимосвязей *i*-ой массы с элементами и характеристиками судна, обосновывая тем или иным способом его вид, опираясь на многолетний опыт и теорию подобий и размерностей. Ниже приведены результаты исследования по выбору оптимальных модулей. Была проанализирована возможность использования шестнадцати модулей, вид которых удалось обобщить на основе изучения исследований, посвященных расчету нагрузки масс на начальных стадиях проектирования [2]. В основе принятого корреляционно-регрессионного анализа для обоснования вида модуля лежит рассмотрение статистической зависимости измерителя массы от того или иного модуля и выявление определенной закономерности его изменения.

Дать оценку тесноты связи между рассматриваемыми переменными позволил коэффициент парной корреляции при линейной зависимости и индекс корреляции при нелинейной зависимости (r). Заметим, что модулю, который точнее характеризует ту или иную массу, соответствует наибольшее абсолютное значение коэффициента корреляции. Если коэффициент корреляции положительный, это означает что увеличение одной переменной связано с увеличением другой и наоборот при отрицательном значении коэффициента.

Критерий Фишера (F) позволяет установить достаточность включенных в уравнение регрессии параметров, составляющих модуль (независимой переменной), для описания измерителя массы (зависимой переменной). Иными словами, на основе F-критерия Фишера производится оценка значимости полученного уравнения регрессии. Фактическое значение F сравнивается с табличным значением $F_{табл}$. При этом, если фактическое значение F-критерия больше табличного, то признается статистическая значимость уравнения в целом. Показатели коэффициентов корреляции и критерия Фишера для рассматриваемых составляющих нагрузки масс в зависимости от модулей представлены в таблице 2.

Рассчитанные коэффициенты парной корреляции показывают отсутствие строгой зависимости между рассматриваемыми переменными. Это можно объяснить тем, что значение измерителя массы определяется не только значением модуля, но и другими неконтролируемыми или же неучтенными факторами. Например, на массу металла корпуса оказывают влияние не только геометрические характеристики корпуса (коэффициенты полноты, соотношения главных размерений), но и также класс судна, число, тип и размеры поперечных и продольных переборок, система набора. Безусловно, на последующих этапах проектирования все это необходимо принимать во внимание.

Таблица 2

Показатели коэффициентов корреляции и критерия Фишера составляющих нагрузки масс в зависимости от модулей

№ п/п	модуль	1			2			3			4		
		металлический корпус			дерево в составе корпуса			оборудование помещений			окраска, цементировка, изоляция, отделка покрытия		
		r	F	$F_{табл}$	r	F	$F_{табл}$	r	F	$F_{табл}$	r	F	$F_{табл}$
1	LBH	-0,544	7,547	4,414	0,712	14,38	4,6	-0,552	8,33	4,381	-0,194	0,669	4,451
2	$\delta^{1/3}L^{4/3}(B+H)$	0,559	8,656	4,381	0,272	1,12	4,6	0,393	3,479	4,381	0,542	5,421	4,67
3	LB^2	-0,586	9,926	4,381	-0,517	5,1	4,6	-0,633	12,674	4,381	-0,351	1,829	4,67
4	$(LBH)^{5/6}$	-0,070	0,089	4,414	-0,019	0,005	4,6	-0,277	1,580	4,381	0,069	0,062	4,67
5	$(LBH)^{2/3}$	0,412	3,683	4,414	0,257	0,992	4,6	0,090	0,156	4,381	0,317	1,45	4,67
6	$(LBH)^2$	-0,945	140,792	4,451	-0,823	27,233	4,67	-0,730	21,674	4,381	-0,878	57,052	4,451
7	$(n_{эк})^{5/6}$	0,375	2,125	4,667	0,446	2,236	5,117	0,415	2,707	4,667	0,343	0,93	5,59
8	$n_{эк}$	0,256	0,909	4,667	0,273	0,726	5,117	0,239	0,789	4,667	0,246	0,452	5,59
9	$(n_{эк})^{2/3}$	0,477	3,828	4,667	0,573	4,394	5,117	0,555	5,792	4,667	0,423	1,522	5,59
10	N	-0,336	2,169	4,451	0,215	0,531	4,844	-0,395	2,960	4,494	-0,046	0,023	4,844
11	N^2	-0,475	4,963	4,451	-0,682	13,881	4,494	-0,684	14,039	4,494	-0,600	8,429	4,543
12	$N^{2/3}$	0,071	0,086	4,451	-0,263	0,893	4,747	-0,008	0,001	4,494	0,325	1,296	4,844
13	LTV^2	-0,493	5,471	4,451	-0,54	4,933	4,747	-0,571	7,755	4,494	-0,309	1,165	4,844
14	$BT\delta^{3/4}$	0,579	9,573	4,381	0,331	1,72	4,6	0,161	0,505	4,381	0,436	3,056	4,67
15	LB	0,523	7,145	4,381	0,234	0,814	4,6	0,373	3,063	4,381	0,257	0,92	4,67
16	$\delta^{1/3}(L/H)^{1/2}LBH$	0,007	0,001	4,381	-0,063	0,056	4,6	-0,266	1,448	4,381	0,241	0,804	4,67
17	$\delta^{1/3}DL^{1/2}(L/H)$	-0,161	0,504	4,381	-0,32	1,6	4,6	-0,324	2,116	4,414	0,184	0,458	4,67

продолжение табл. 2

№ п/п	модуль	5			6			7			8		
		дельные вещи			судовые устройства			палубные механизмы			снабжение и инвентарь		
		r	F	$F_{табл}$	r	F	$F_{табл}$	r	F	$F_{табл}$	r	F	$F_{табл}$
1	LBH	-0,625	8,97	4,6	-0,17	0,416	4,6	0,389	2,313	4,67	-0,621	8,793	4,6
2	$\delta^{1/3}L^{4/3}(B+H)$	-0,055	0,043	4,6	0,485	4,3	4,6	0,727	14,61	4,67	0,213	0,662	4,6
3	LB^2	-0,697	13,207	4,6	-0,4	2,67	4,6	0,096	0,122	4,67	-0,687	12,527	4,6
4	$(LBH)^{5/6}$	-0,48	4,185	4,6	0,066	0,062	4,6	0,524	4,915	4,67	-0,268	1,087	4,6
5	$(LBH)^{2/3}$	-0,29	1,281	4,6	0,277	1,16	4,6	0,63	8,55	4,67	0,236	0,822	4,6
6	$(LBH)^2$	-0,873	57,751	4,414	-0,699	16,198	4,451	-0,881	44,928	4,667	-0,845	44,776	4,414
7	$(n_{эк})^{5/6}$	-0,201	0,338	5,32	-0,265	0,606	5,32	0,57	3,844	4,96	0,202	0,382	5,12
8	$n_{эк}$	-0,283	0,698	5,32	-0,326	0,953	5,32	0,523	3,008	4,96	0,027	0,0067	5,12
9	$(n_{эк})^{2/3}$	-0,11	0,098	5,32	-0,198	0,326	5,32	0,611	4,76	4,96	0,352	1,269	5,12
10	N	-0,546	5,094	4,747	0,057	0,039	4,75	-0,057	0,036	4,84	-0,471	3,417	4,75
11	N^2	-0,641	11,184	4,494	-0,648	11,589	4,494	-0,261	1,021	4,600	-0,689	14,462	4,494
12	$N^{2/3}$	-0,232	0,684	4,747	0,444	2,95	4,75	0,26	0,798	4,84	0,032	0,012	4,75
13	LTV^2	-0,585	6,236	4,747	-0,322	1,391	4,75	-0,385	1,908	4,84	-0,703	11,751	4,75
14	$BT\delta^{3/4}$	-0,166	0,399	4,6	0,573	6,849	4,6	0,918	59,190	4,84	-0,041	0,024	4,6
15	LB	-0,152	0,329	4,6	0,353	1,99	4,6	0,632	8,647	4,67	0,188	0,515	4,6
16	$\delta^{1/3}(L/H)^{1/2}LBH$	-0,479	4,158	4,6	0,164	0,385	4,6	0,638	8,913	4,67	-0,347	1,922	4,6
17	$\delta^{1/3}DL^{1/2}(L/H)$	-0,499	4,65	4,6	0,13	0,241	4,6	0,022	0,0061	4,67	-0,497	4,609	4,6

продолжение табл. 2

№ п/п	модуль	9			10			11		
		механизмы			судовые системы			электрооборудование и радиооборудование		
		r	F	$F_{табл}$	r	F	$F_{табл}$	r	F	$F_{табл}$
1	LBH	-0,585	6,777	4,67	-0,576	7,47	4,54	-0,332	1,738	4,6
2	$\delta^{1/3}L^{4/3}(B+H)$	0,399	2,456	4,67	0,231	0,849	4,54	0,4	2,666	4,6
3	LB^2	-0,689	11,725	4,6	-0,743	18,499	4,54	-0,517	5,103	4,6
4	$(LBH)^{5/6}$	-0,249	0,859	4,67	-0,325	1,769	4,54	-0,118	0,199	4,6
5	$(LBH)^{2/3}$	0,119	0,185	4,67	-0,039	0,022	4,54	0,108	0,167	4,6
6	$(LBH)^2$	0,951	123,52	4,67	-0,702	17,513	4,41	-0,840	42,99	4,41
7	$(n_{эк})^{5/6}$	0,237	0,475	5,32	0,154	0,22	5,12	0,034	0,009	5,32
8	$n_{эк}$	0,152	0,188	5,32	0,034	0,01	5,12	-0,057	0,026	5,32
9	$(n_{эк})^{2/3}$	0,314	0,873	5,32	0,263	0,671	5,12	-0,509	2,45	5,32
10	N	-0,262	0,888	4,75	-0,292	1,213	4,67	-0,119	0,173	4,75
11	N^2	-0,933	107,65	4,49	-0,683	14,88	4,45	-0,871	50,37	4,49
12	$N^{2/3}$	0,378	2,005	4,75	0,329	1,581	4,67	0,379	2,018	4,75
13	LTV^2	-0,499	3,998	4,84	-0,579	6,552	4,67	-0,46	3,214	4,75
14	$BT\delta^{3/4}$	0,352	1,985	4,6	0,192	0,577	4,54	0,393	2,56	4,6
15	LB	0,685	11,507	4,67	0,126	0,244	4,54	0,247	0,913	4,6
16	$\delta^{1/3}(L/H)^{1/2}LBH$	0,082	0,088	4,67	-0,327	1,796	4,54	-0,015	0,003	4,6
17	$\delta^{1/3}DL^{1/2}(L/H)$	-0,129	0,238	4,6	-0,29	1,385	4,54	0,075	0,078	4,6

В анализе были учтены только суда класса «Р», поскольку их число преобладающее из ряда рассматриваемых. На рис. 1 приведена зависимость измерителя массы металлического корпуса от наилучшего, по приведенным выше критериям, модуля.

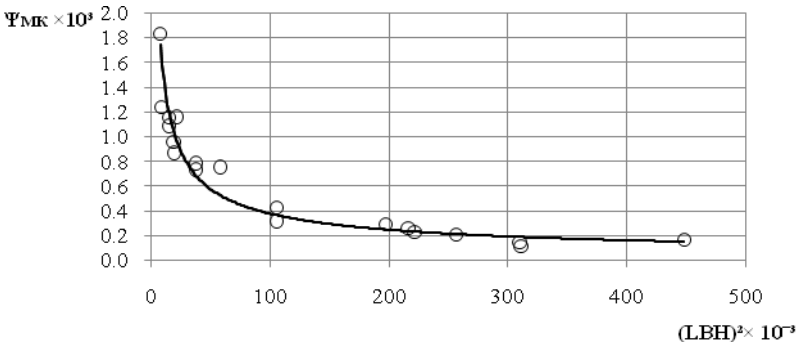


Рис. 1. Измеритель массы металлического корпуса

В результате аппроксимации была получена следующая зависимость:

$$\psi_{МК} = 0{,}461 \cdot (LBH)^{-1{,}22} \pm 0{,}101 \times 10^{-3} \qquad (4)$$

На рис. 2 показана графическая зависимость измерителя массы дерева в составе корпуса и надстроек от того же модуля.

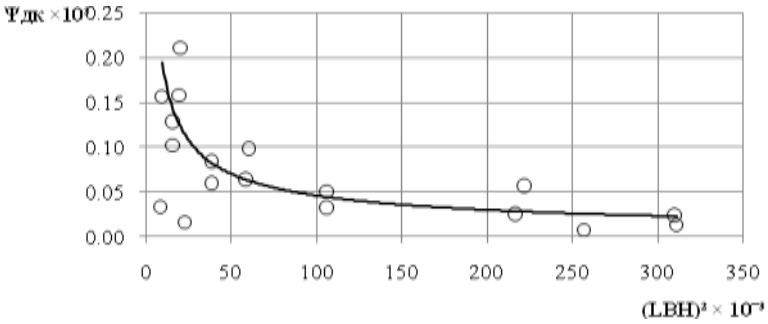


Рис. 2. Измеритель массы дерева в составе корпуса и надстроек

Регрессионное уравнение получено в виде:

$$\psi_{ДК} = 0{,}049 \cdot (LBH)^{-1{,}2} \pm 0{,}233 \times 10^{-4} \qquad (5)$$

Наиболее тесная зависимость измерителя массы оборудования помещений также наблюдается от модуля, в состав которого входят размерения судна (рис. 3). Численность экипажа безусловно также влияет на величину Ψдк , что показал проведенный анализ, но в силу того, что исследование производилось между судами разного назначения эта зависимость получилась более чем условной.

Аналитическая зависимость измерителя массы оборудования помещений от оптимального модуля:

$$\psi_{ОБ.П} = 0{,}021 \cdot (LBH)^{-1{,}22} \pm 0{,}124 \times 10^{-4} \qquad (6)$$

На измеритель массы окраски, цементировки, изоляции, как показал анализ, подавляющее влияние оказывают размеры судна (рис. 4)

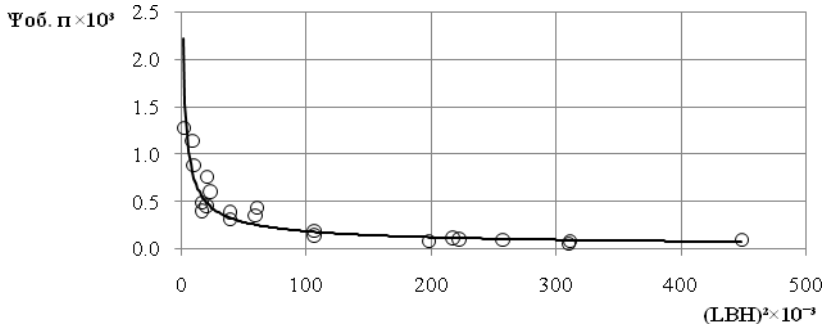


Рис. 3. Измеритель массы оборудования помещений

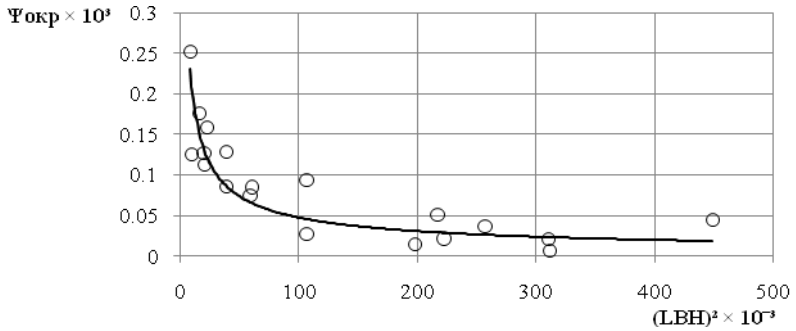


Рис. 4. Измеритель массы окраски, цементировки, изоляции

Аппроксимация позволила получить следующую зависимость:

$$\psi_{OKP} = 0{,}076 \cdot (LBH)^{-1{,}28} \pm 0{,}227 \times 10^{-4} \qquad (7)$$

Измеритель массы дельных вещей целесообразно рассчитывать с использованием модуля, характеризующего размеры корпуса судна, что и подтверждает проведенное исследование (рис. 5).

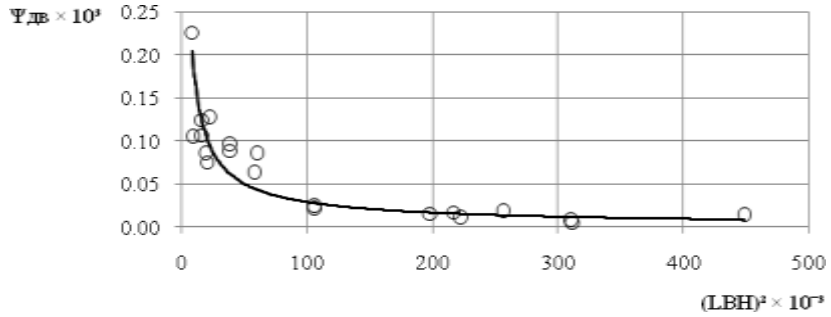


Рис. 5. Измеритель массы дельных вещей

Уравнение регрессии имеет вид:

$$\psi_{ДВ} = 0{,}242 \cdot (LBH)^{-1{,}56} \pm 0{,}184 \times 10^{-4} \qquad (8)$$

Более тесная зависимость измерителя массы судовых устройств получена от модуля $1/3(LBH)^2$ (рис. 6) и модуля $BT\delta^{3/4}$, однако от последнего эта зависимость выражена в меньшей степени.

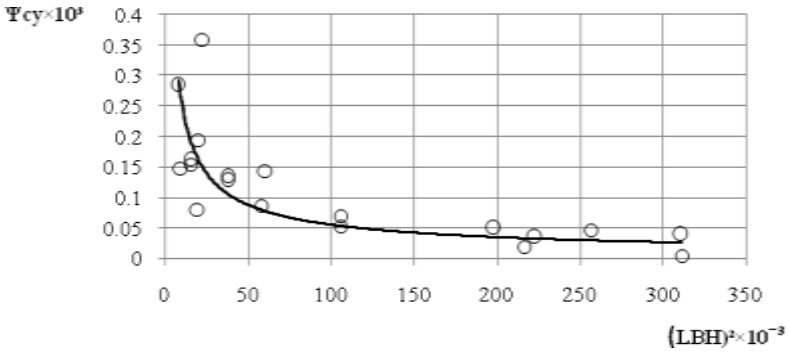


Рис. 6. Измеритель массы судовых устройств

Аналитически зависимость записывается в виде:

$$\psi_{CУ} = 0{,}127 \cdot (LBH)^{-1{,}34} \pm 0{,}400 \times 10^{-4} \qquad (9)$$

Наиболее выражена зависимость измерителя массы палубных механизмов от модулей, в состав которых входят геометрические размеры судна.

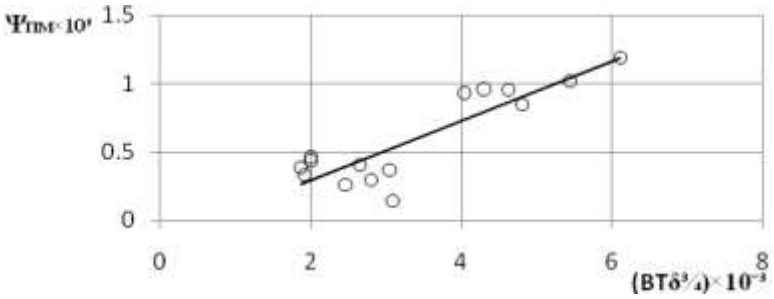


Рис. 7. Измеритель массы палубных механизмов

Уравнение регрессии имеет вид:

$$\psi_{ПМ} = 0{,}217 \cdot \left(BT\delta^{3/4}\right) - 0{,}141 \pm 0{,}126 \qquad (10)$$

На измеритель массы снабжения и инвентаря , как показал анализ, наибольшее влияние оказывают модули, описывающие геометрию судна. Зависимость $\Psi_{сн,и}$ от модуля $1/3(LBH)^2$ показана на рис. 8.

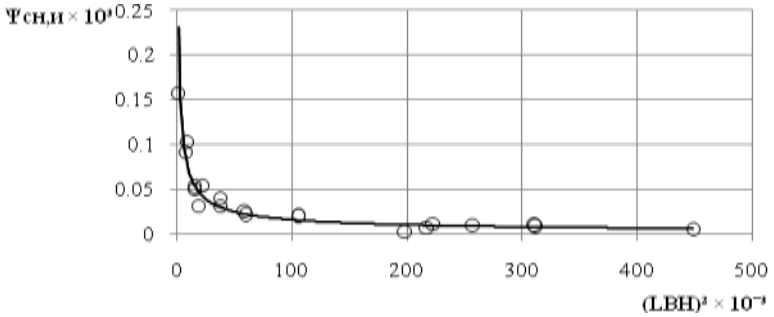


Рис. 8. Измеритель массы снабжения и инвентаря

Аналитическая зависимость представлена в виде:

$$\psi_{CH.И} = 0{,}033 \cdot (LBH)^{-1{,}32} \pm 0{,}900 \times 10^{-5} \qquad (11)$$

Результаты анализа выявили более тесную зависимость измерителя массы механизмов от модулей $(LBH)^2$ и N^2 (рис. 9).

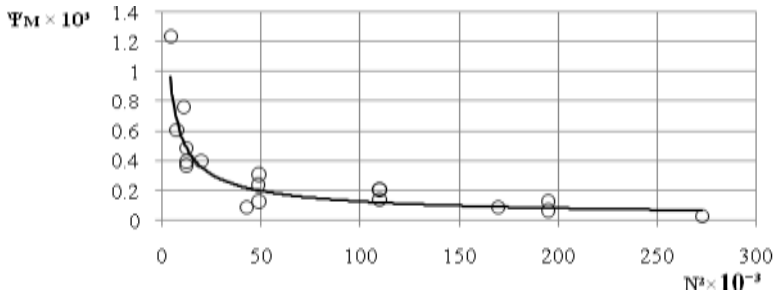


Рис. 9. Измеритель массы механизмов

Уравнения регрессии имеют вид:

$$\psi_M = 0{,}234 \cdot (N)^{-1{,}3} \pm 0{,}841 \times 10^{-4} \qquad (12)$$

Масса судовых систем и трубопроводов, также как и масса электрооборудования и радиооборудования, как показало исследование, зависят от размерений судна (рис. 10–11).

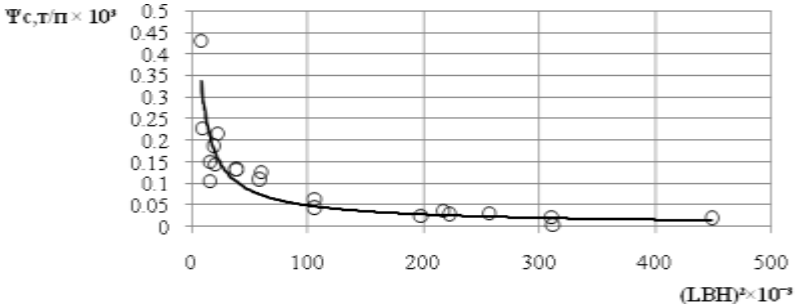


Рис. 10. Измеритель массы систем и трубопроводов

Уравнение регрессии:

$$\psi_{C,T/П} = 0{,}347 \cdot (LBH)^{-1{,}52} \pm 0{,}272 \times 10^{-4} \qquad (13)$$

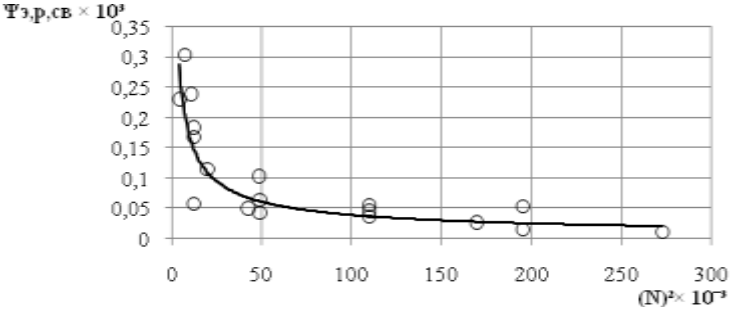


Рис. 11. Измеритель массы электрооборудования и радиооборудования

Уравнение регрессии:

$$\psi_{ЭР} = 0{,}061 \cdot (LBH)^{-1{,}26} \pm 0{,}289 \times 10^{-4} \quad (14)$$

Используя полученные зависимости было рассчитано водоизмещение порожнем для каждого проекта рассматриваемых судов (табл. 3).

Таблица 3

Анализ точности расчета водоизмещения

Номера проектов	Водоизмещение фактическое, т	Водоизмещение расчетное, т	Относительная погрешность, %
306	80,53	86,38	7,26
908	145,2	141,05	2,86
878	31,5	30,77	2,31
391А	42,4	44,26	4,39
Р-96А	47,3	46,79	1,08
391Б	42,36	44,24	4,45
796	119	118,95	0,04
911	105,7	108,67	2,81
1741	210	214,67	2,22
Р-162	128,5	115,18	10,37
Р121	127	120,77	4,90
809	50,2	47,16	6,05
911В	122,7	121,09	1,32
81350	100,92	101,18	0,26
81240	74,07	72,94	1,53
81240А	67,64	67,16	0,71
3050	35,44	35,64	0,56
3050.1	58,85	53,82	8,55
3052	116,9	123,14	5,34

Сопоставив результаты, полученные расчетным путем, с фактическими значениями, можно сделать вывод о допустимости использования предлагаемых выражений для определенных измерителей масс при подсчете составляющих нагрузки обстановочных судов на начальном этапе проектирования, поскольку относительная погрешность вычисления водоизмещения составила не более 10%.

Список литературы

[1] Ашик В.В. Проектирование судов: учебник / В.В. Ашик. – Л.: Судостроение, 1985. – 320 с.
[2] Поспелов В.И. Выбор на ЭВМ оптимальных элементов грузовых судов внутреннего плавания / В.И. Поспелов. – Л.: Судостроение, 1978. – 76 с.

MASS LOAD CALCULATION OF INLAND WATERWAY BUOY-LAYING VESSELS

E.P. Ronnov, V.V. Anisimova

In the article an analysis of mass load of inland waterway buoy-laying vessels is given. Results of correlation and regression analysis are presented in order to choose the module type which is necessary to determine each of the components of mass loading. Statistical dependencies of mass measuring device versus optimum module have been obtained.

УДК 629.12.001.2

***Е.П. Роннов**, д.т.н., проф. ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
***Д.В. Волков**, аспирант-стажер ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

ОЦЕНКА ОСТОЙЧИВОСТИ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Усовершенствован ранее разработанный метод расчета остойчивости, позволивший повысить точность расчета и распространить его на буксиры-толкачи и пассажирские суда.

Для оценки уровня остойчивости и соответствия её нормам Речного Регистра необходимо иметь диаграмму плеч статической и динамической остойчивости.

В работе [1] нами была предложена методика расчета характеристик остойчивости судов внутреннего плавания на стадиях, когда теоретический чертеж ещё не разработан.

Известно, что для расчета плеча статической остойчивости при наклонениях судна на большие углы необходимо знать координаты центра величины y_c и z_c при равнообъемном наклонении судна. Они являются функциями угла крена и рассчитываются по выражениям [2]

$$y_c = \int_0^\theta r_\theta \cos d\theta$$
$$z_c = \int_0^\theta r_\theta \sin d\theta, \qquad (1)$$

где r_θ – метацентрический радиус при наклонении судна на угол θ.

При наличии теоретического чертежа или математической модели судовой поверхности расчет этих величин не представляет затруднений. В [1] для расчета метацентрического радиуса предложен подход, в соответствии с которым, не используя теоретический чертеж, величина метацентрического радиуса приближенно может быть рассчитана

$$r_\theta = k_\theta r_0, \qquad (2)$$

где r_0 – метацентрический радиус при нулевом угле крена;
k_θ – коэффициент метацентрического радиуса.

Коэффициент k_θ представляет собой соотношение двух метацентрических радиусов

$$k_\theta = \frac{r_\theta}{r_0} = \frac{I_{x_\theta}}{r_0 V}, \qquad (3)$$

где V – объемное водоизмещение судна;
$I_{x\theta}$ – момент инерции площади ватерлинии относительно продольной центральной оси при наклонении судна на угол θ.

Представляя $I_{x\theta}$ как момент инерции прямоугольной ватерлинии, откорректированный на отличие её от действительной как по форме, так и на взаимное положение центральных осей, для расчета коэффициента k_θ получено выражение

$$k_\theta = \frac{A(x)}{1{,}05\alpha^2}\frac{B_\theta}{B^3}\left(B_\theta^2 + 12\eta_\theta^2\right), \tag{4}$$

где B_θ – ширина ватерлинии при наклонении судна на угол θ;
B – ширина судна;
η_θ – расстояние между центральной осью наклонной прямоугольной ватерлинии и диаметральной плоскостью судна.

Функция *A(x)*, учитывающая отличие момента инерции действительной ватерлинии от прямоугольной и их взаимное положение центральных осей, на основе обработки статистических данных по грузовым судам получена в следующем виде [2]

$$A(x) = 0{,}5\delta + 0{,}415 \pm 0{,}1. \tag{5}$$

где δ – коэффициент полноты водоизмещения.

Выполненный анализ возможности использования выражений (4) и (5) для расчета остойчивости не грузовых судов, а именно буксиров-толкачей и пассажирских судов внутреннего плавания показал, что в некоторых случаях имеют место значительные отличия действительных значений коэффициента k_θ от рассчитанных $k_{\theta p}$ по формуле (4). Как видно из табл.1 относительная разница этих величин на наиболее «проблемных» судах достигает недопустимо больших значений.

Таблица 1

Относительная величина отклонения расчетного коэффициента k_θ от действительных значений

Тип судна	$(k_\theta - k_{\theta p}) / k_\theta$, % при угле крена			
	30°	50°	70°	Среднее значение
Пассажирский т/х пр. 780	24*/0,05	44/0	52/0,1	40/0,05
пр. 588	5/1,4	20/2,9	23/14	16/6,1
пр. 646	7/1,27	25/2,72	42/11,8	24,7/5,3
Толкач пр. 947	32/1,76	43/7,9	51/7,98	42/5,9

* – в числителе относительная разница величины коэффициента k_θ, рассчитанного по формуле (4), в знаменателе – с учётом формулы (7).

Даже её среднее значение составляет 42%, тогда как отдельные отклонения этой величины доходят до 52%.

Полученные погрешности являются следствием не полного учета особенностей формы корпуса, особенно надводной его части, присущей судам различных типов. В связи с чем в выражение (5) введем поправочный коэффициент a_θ,

$$A(x) = (0{,}5\delta + 0{,}415)a_\theta, \tag{6}$$

учитывающий эти особенности.

Выражение для расчета этого коэффициента имеет вид

$$a_\theta = a_1\delta^2 + a_2\delta + b. \tag{7}$$

Значения коэффициентов a_1, a_2 и b приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты a_1, a_2, b в зависимости от угла наклонения судна

Тип судна	a_1			a_2			b		
	30°	50°	70°	30°	50°	70°	30°	50°	70°
Пассажирское	21,11	19,37	28,83	-27,82	-26,84	-40,39	9,96	10,32	15,10
Грузовое	-84,08	-51,50	-1249,1	136,40	83,33	2013,87	-53,65	-32,52	-808,78
Буксир-толкач	-26,94	392,23	36,72	27,36	465,56	-47,64	-5,43	138,27	16,85

В табл. 1 в знаменателе приведены значения отклонения коэффициента k_θ, подсчитанного по выражениям (6) и (7) от действительных. Как видно из анализа этих значений средняя величина отклонений составляет не более 6,1%, что говорит о существенном повышении адекватности предлагаемой методики расчета остойчивости и возможности её использования на начальных стадиях проектирования, когда теоретический чертеж ещё не разработан.

Список литературы

[1] Роннов Е.П. Расчет характеристик остойчивости грузовых судов внутреннего плавания на ранних стадиях проектирования / Е.П. Роннов. – Труды ГИИВТ, 1985. – Вып. 211, – С. 151–159.
[2] Благовещенский С.Н. Справочник по статике и динамике корабля. Т. 1. Статика корабля / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодилин. – Л.: Судостроение, 1975. – 336 с.

ESTIMATION OF INLAND WATERWAY VESSEL STABILITY AT EARLY STAGES OF DESIGN

E.P. Ronnov, D.V. Volkov

Previously developed method of calculating stability has been improved, which has helped to increase the accuracy of the calculation as well as to apply this method to pusher tugs and passenger vessels.

УДК 629.12

***Е.П. Роннов**, д.т.н. профессор, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
***В.М. Шмаков**, к.т.н. доцент ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЕВРОПЕЙСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ОСТОЙЧИВОСТИ И НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ

Приводятся результаты сравнительного численного анализа требований к остойчивости и непотопляемости судов отечественных нормативных документов и документов Европейской экономической комиссии при ОНН.

В перспективе предстоит открытие внутренних водных путей России для судов, плавающих под флагом других государств. В связи с этим возникает проблема гармонизации требований документов, регламентирующих меры по обеспечению безопасности плавания судов в соответствии с международной практикой сотрудничества в этой области.

Для судов внутреннего плавания важными качествами, обеспечивающими безопасность плавания, являются остойчивость и непотопляемость судна. В нашей стране требования к указанным качествам судов установлены Правилами [1] Российского Речного Регистра (РРР). Аналогичные качества для судов стран Европейской экономической комиссии при ООН (ЕЭК ООН) нормируются соответствующими резолюциями и директивами [2], [3].Анализ положений указанных документов показывает, что принципиальные основы нормирования, как остойчивости, так и непотопляемости, тождественны.

Остойчивость пассажирских и грузовых судов как в соответствии с документами ЕЭК ООН, так и в соответствии с Правилами РРР, проверяют по основному критерию и по дополнительным требованиям. Однако, при общем подходе к нормированию остойчивости и непотопляемости имеются различия, как в составе нормируемых параметров, так и в численных значениях величин, входящих в расчетные формулы и выражения.

Так, при проверке остойчивости по основному критерию в соответствии с документами ЕЭК ООН, принимаются повышенные по сравнению с Правилами РРР значения ветрового давления в зависимости от возвышения центра парусности над ватерлинией, упрощенно определяют приведенное плечо кренящей пары, принимая центр давления воды при дрейфе судна на уровне половины осадки независимо от ширины судна. При таком подходе к определению приведенного плеча кренящей пары не учитывается действие дополнительного момента от перераспределения давления воды по днищу судна.

Значения плеч кренящего момента, определяемые по документам ЕЭК ООН для пассажирских судов, в некоторых случаях оказываются меньше значений плеч по Правилам РРР на 6–8%. Погрешности в этих случаях допускаются в опасную сторону.

Структура Дополнительных требований в рассматриваемых документах может считаться, в основном, аналогичной, за исключением требований к диаграмме плеч статической остойчивости, предъявляемых Резолюцией №61 ЕЭК. Однако значение нормируемых параметров в этих методиках проверки остойчивости в ряде случаев существенно отличается. Это, прежде всего, касается дополнительных требований к пассажирским судам, а именно давления ветровой нагрузки, приведённого плеча кренящего момента от неё, кренящего момента от скопления пассажиров и на циркуляции, допустимых углов крена.

Кренящий момент от скопления пассажиров на одном борту в соответствии с документами ЕЭК ООН может быть подсчитан по выражениям:

$M_n = 1.1F_{\max} \cdot 0.075 \cdot B/2$ – для судов, совершающих дневные рейсы;

$M_n = 1.5F_{\max} \cdot 0.075 \cdot B/2$ – для каютных пассажиров,

где $F_{\max}$ – наибольшее количество пассажиров.

В результате кренящий момент от скопления пассажиров на одном борту для пассажирских судов по документам ЕЭК ООН может быть в 5.5 раза больше, чем по правилам РРР.

Аналогичные соотношения получаются и при расчете кренящего момента на циркуляции, что следует из сравнения соответствующих выражений:

$M_ц = c \cdot (0.8v)^2 \cdot D/L \cdot (z_g - a_3T)$ – по Правилам РРР

$M_ц = c \cdot \delta \cdot v^2 \cdot D/L \cdot (z_g - T/2)$ – по документам ЕЭК ООН

Численные значения кренящих моментов по документам ЕЭК ООН могут превосходить значения кренящих моментов по Правилам РРР в несколько раз.

Целью нормирования непотопляемости является сохранение минимально необходимой плавучести и остойчивости поврежденного судна.

Анализ требований Правил РРР и нормативных документов ЕЭК ООН по обеспечению непотопляемости показывает, что общим для этих документов является детер-

минированный подход, заключающийся в нормировании допустимых параметров посадки и характеристик диаграммы аварийной остойчивости при затоплении установленного, в зависимости от типа судна, количества отсеков (стандарта непотопляемости), с учетом их расположения по длине и ширине судна.

При наличии общего подхода к обеспечению непотопляемости в рассматриваемых документах имеются существенные отличия в:

– размерах повреждения корпуса;

– стандарте непотопляемости;

– значениях коэффициентов проницаемости;

– численных значениях нормируемых параметров посадки;

– составе и численных значениях нормируемых характеристик диаграммы аварийной остойчивости.

В таблице 1 приведены нормируемые разными документами размеры повреждений корпуса, которые влияют на длину затопления, объем влившейся забортной воды, параметры посадки и характеристики диаграммы аварийной остойчивости.

Можно отметить, что в документах ЕЭК ООН установлены разные размеры повреждений по отдельным типам судов, а для грузовых судов – еще и в зависимости от их длины. Численные значения размеров повреждений, установленных в документах ЕЭК ООН могут превышать аналогичные размеры Правил РРР до 2,5 раз.

Таблица 1

Тип судна	Размеры повреждений, м		
	Надзорный орган	ЕЭК ООН	РРР
Пассажирские	Бортовые		
	Длина, м	1,2+0,07L	0,04L
	Ширина, м	B/5	0,075B или 0,9 м
	По вертикали	Без ограничения вверх	Без ограничения вверх
	Размеры повреждений по днищу		
	Длина, м	1,2+0,07L	0,04L
	Ширина, м	B/5	0,1B
	По вертикали, м	0,59	0,05B или 0,8 м
Грузовые, длиной до 110 м	Бортовые		
	Длина, м	Не менее 0,1L	0,04L
	Ширина, м	0,59	0,075B или 0,9 м
	По вертикали	Без ограничения вверх	Без ограничения вверх
	Размеры повреждений по днищу		
	Длина, м	Не менее 0,1L	0,04L
	Ширина, м	3,00 в попереч, направ,	0,1B
	По вертикали, м	от ОП вверх 0,39	0,05B или 0,8 м
	Бортовые		
Грузовые, длиной свыше 110 м	Длина, м	0,1L, но ≥ 5,0 м	0,04L
	Ширина, м	3,0 в попереч, направ,	0,075B или 0,9 м
	По вертикали	Без ограничения вверх	Без ограничения вверх
	Размеры повреждений по днищу		
	Длина, м	0,1L, но ≥ 5,0 м	0,04L
	Ширина, м	3,0 в попереч, направ,	0,1B
	По вертикали, м	от ОП вверх 0,49	0,05B или 0,8 м

Как сказываются разные подходы к нормированию размеров повреждений, показано на примере сухогрузного теплохода пр. 507Б приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Размеры повреждений судна пр. №507Б

По документам ЕЭК ООН											
Пр. №507Б	Длина повреждения, м 13.5										
№ отсека	1	2	3	1+2+3	4	5	6	7	8	9	8+9
Длина отсека, м	8,2	5,4	24,6	–	24,0	24,0	23,7	14,7	6,6	8,4	–
Длина затопления, м	8,2	5,4	24,6	38,2	24,0	24,0	23,7	14,7	6,6	8,4	15,0
Объем влившейся воды, м^3	69,2	169,	680	1152	651	613	588	894	221	53	328

Таблица 3

По правилам РРР									
Пр. №507Б	Длина повреждения, м 5,4								
№ отсека	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длина отсека, м	8,2	5,4	24,6	24,0	24,0	23,7	14,7	6,6	8,4
Длина затопления, м	8,2	5,4	24,6	24,0	24,0	23,7	14,7	6,6	8,4
Объем влившейся воды, м^3	69,2	169,	336	314	315	315	894	221	53

В таблице 2, где номерами 3, 4, 5 и 6 обозначены отсеки междудонных и межбортовых пространств, приведены:

– фактическая длина отсеков;

– длина затопления, принимаемая в соответствии с нормами (табл. 1);

– объемы влившейся воды в затопленный отсек.

Данные, приведенные в таблицах 2 и 3 показывают, что по разному нормируемые размеры повреждений корпуса судна существенно влияют на длину затопления и объемы влившейся воды и как следствие, на параметры посадки и характеристики диаграммы аварийной остойчивости.

Существенным отличием в нормировании непотопляемости документами ЕЭК ООН является то, что параметры посадки и характеристики остойчивости проверяются при последовательном затоплении всех имеющихся на судне отсеков независимо от типа судна. В соответствии с требованиями этих документов необходимо рассматривать комбинацию из двух или более одновременно затопленных отсеков, когда длина повреждения превышает длину отсека.

Например, для судна пр. №507Б такими комбинациями являются одновременно затопляемые отсеки с номерами 1, 2, 3 и 8, 9 , так как средний отсек в первой комбинации и оба отсека во второй комбинации имеют длину меньшую, чем длина повреждения.

Исключение из этого правила делается для машинного отделения всех судов, для которого «учитывается только стандарт одноотсечной непотопляемости, т.е. крайние переборки машинного отделения считаются неповрежденными», а так же для пассажирских судов при условии, что:

– длина судна не более 45 м;

– количество перевозимых пассажиров не более 250.

Кроме того, документы ЕЭК ООН устанавливают, что при повреждении днища пробоина попадает на продольную переборку, т.е. для судов, имеющих продольные непроницаемые переборки или кильсоны в междудонном пространстве, нормируемые параметры посадки и остойчивости следует определять при затоплении двух смежных

отсеков по ширине судна. При этом затопление корпуса всегда будет симметричным, а объем влившейся воды увеличится в несколько раз.

В соответствии с требованиями Правил РРР требования к непотопляемости должны выполняться при затоплении каждого отсека только пассажирских судов, а у грузовых судов внутреннего плавания независимо от их длины – только при затоплении пиковых отсеков.

Как отличаются параметры посадки и объем влившейся воды при затоплении междудонного и межбортового отсека, примыкающего к машинному отделению на примере танкера пр. №587, показаны в таблице 4.

Таблица 4

	Правила РРР	ЕЭК ООН
Угол крена, град	4,8	0,0
Дифферент, см	–46,2	–89,3
Объем влившейся воды, $м^3$	216	450
Минимальный надводный борт (на стороне наклонения), м	–0,01 Не выполняется требование к параметрам посадки	0,5

Различия в назначении коэффициентов проницаемости состоят в следующем. В соответствии с документами ЕЭК ООН коэффициент проницаемости принимается равным 95%. Если в результате расчетов доказано, что в каком-либо отсеке средняя проницаемость составляет менее 95%, то вместо этой величины может использоваться значение, полученное расчетным путем.

Значения коэффициентов проницаемости должны быть не менее:

Салоны – 95%

Машинное и котельное отделения – 85%

Багажные отделения и кладовые – 75%

Междудонное пространство, топливные цистерны, балластные и прочие цистерны в зависимости от того, должны ли эти емкости в соответствии с их назначением считаться заполненными или порожними, когда судно погружено по плоскость наибольшей осадки: 0 или 95%.

В отличие от Правил РРР, документы не содержат явных указаний по выбору значений коэффициентов проницаемости грузовых помещений в зависимости от рода перевозимого груза. «Расчетным путем» достоверные значения коэффициентов проницаемости грузовых помещений получить невозможно.

В свою очередь, Правила РРР не дают ни каких указаний по выбору коэффициентов проницаемости танков и цистерн, заполняемых жидким грузом. При значительных размерах повреждений происходит замещение перевозимого груза забортной водой.

Параметры посадки в соответствии с нормами документов ЕЭК следующие:

1. *Пассажирские суда*

1.1. В конечной стадии затопления палуба переборок не должна входить в воду;

1.2. В конечной стадии затопления угол крена с учетом кренящего момента от скопления пассажиров не должен превышать 10°;

1.3. Открытые отверстия не должны погружаться в воду до достижения положения равновесия; если такие отверстия погружаются в воду до достижения этого положения, то помещения, сообщающиеся с затопленным, при расчете аварийной остойчивости считаются затопленными;

2. *Сухогрузные и наливные длиной менее 110 м*

2.1. В конечной стадии затопления нижние кромки открытых отверстий должны отстоять от аварийной ватерлинии не менее, чем на 0,1 м;

2.2. Угол крена судна не должен превышать 5°.

3. *Грузовые суда длиной более 110 м*

3.1. В конечной стадии затопления нижние кромки открытых отверстий должны отстоять от аварийной ватерлинии не менее, чем на 0,1 м;

3.2. Угол крена судна не должен превышать 12°.

3.3. Если открытые отверстия погружаются в воду до достижения конечной стадии затопления, то соответствующие помещения должны считаться затопленными при расчете остойчивости.

Нормируемые характеристики диаграммы аварийной остойчивости по документам ЕЭК ООН:

1. *Пассажирские суда*

1.1. Наибольшее плечо диаграммы должно иметь значение не менее 0,05 м.

1.2. Площадь под кривой диаграммы с положительными плечами должна иметь значение не менее 0,0065 м·рад.;

Приведенные минимальные значения плеча и площади (остаточной динамической остойчивости) должны достигаться до погружения в воду наиболее низко расположенного открытого отверстия или в любом случае до достижения угла крена, равного 25°.

Нормируемое значение площади диаграммы за пределами угла статического равновесия характеризует способность поврежденного судна противодействовать наклонениям под внешним воздействием и снижает как вероятность опрокидывания судна, так и заливания корпуса через открытые отверстия в неблагоприятных условиях плавания.

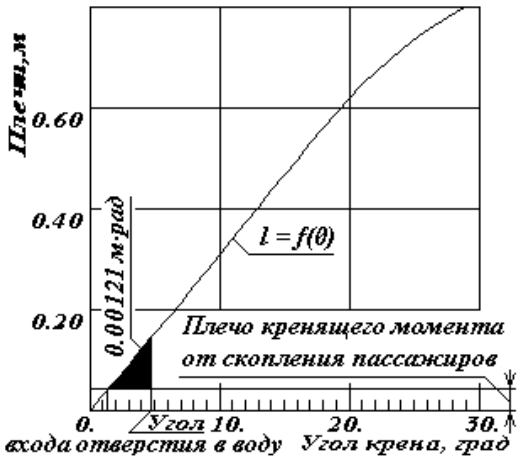


Рис.1. Площадь под диаграммой при затоплении машинного отделения судна пр. № 588

2. *Сухогрузные и наливные длиной менее 110 м.*

2.1. Наибольшее плечо диаграммы должно иметь значение не менее 0,05 м.

2.2. Площадь под кривой диаграммы с положительными плечами должна иметь значение не менее 0,0065 м·рад.;

3. *Сухогрузные и наливные длиной более 110 м.*

3.1. Наибольшее плечо диаграммы должно иметь значение не менее 0,05 м.

3.2. Площадь под кривой диаграммы с положительными плечами должна иметь значение не менее 0,0065 м·рад.;

Минимальные значения плеча и площади должны достигаться до погружения в воду наиболее низко расположенного открытого отверстия или в любом случае до достижения угла крена, равного 27°.

Состав и нормы параметров диаграммы аварийной остойчивости документов ЕЭК ООН значительно отличаются от аналогичных норм Правил РРР.

Из 152 рассмотренных случаев затопления отсеков судов – представителей невыполнение требований к непотопляемости, установленных документами ЕЭК ООН, выявлено в 40 случаях. Десять случаев из них приходится на значение контролируемой площади под диаграммой аварийной остойчивости.

В 17 случаях из общего числа не выполняются требования документов ЕЭК ООН к параметрам посадки поврежденного судна.

В заключение можно отметить, что документами ЕЭК ООН установлена значительно более высокая степень обеспечения непотопляемости, как в отношении плавучести, так и в отношении аварийной остойчивости. Однако такая необходимость должна подтверждаться аварийной статистикой.

Список литературы

[1] Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания в 4 т. Т. 2 / Российский Речной Регистр –М., 2008. – 406 с.
[2] Европейская экономическая комиссия. Комитет по внутреннему водному транспорту. Резолюция № 61 «Рекомендации, касающиеся согласованных на европейском уровне технических предписаний, применимых к судам внутреннего плавания». Организация объединенных наций. Нью-Йорк, Женева, 2006 год.
[3] Директива Европейского Парламента и Совета ECE/TRANS/SC.3/172 от 12 декабря 2006 г.

COMPARISON OF NATIONAL AND EUROPEAN REQUIREMENTS OF STABILITY AND UNSINKABILITY OF INLAND WATERWAY VESSELS

E.P. Ronnov, V.M. Shmakov

Results of comparative and numerical analysis of stability and unsinkability requirements are presented for vessels as stated in national normative documents and documents of the European Economic commission at the UN.

УДК 629.5.021.1

***С.В. Студнев**, аспирант-стажёр ФБОУВПО «ВГАВТ».*
***Т.А. Михеева**, к.т.н., ст. препод. ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
***Е.Г. Бурмистров**, д.т.н., проф., ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ УТИЛИЗИРУЕМЫХ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО И СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ

Рассматривается проблема утилизации физически и морально устаревших судов внутреннего и смешанного (река–море) плавания. Приведены результаты анализа существующих архитектурно-конструктивных типов утилизируемых судов с точки зрения их утилизационной пригодности.

Технические характеристики судна, утраченные в процессе эксплуатации, в результате ремонта восстанавливаются практически до построечных значений. При этом каждый последующий ремонт, как правило, обходиться дороже, чем предыдущий и, в конечном итоге, наступает момент, когда прибыль от дальнейшей эксплуата-

ции судна уже не может окупить расходы на ремонт. Такие суда подлежат списанию. Списанию также подлежат суда ещё не вполне исчерпавшие свой физический ресурс, но дальнейшая эксплуатация которых, вследствие проектных ошибок или изменения конюктуры рынка, также является убыточной.

Морально устаревшие суда, как правило, подвергают модернизации и переоборудованию с изменением назначения, класса, главных размерений, заменой главной энергетической установки и т. д. Физически же изношенные суда утилизируют, а их корпуса и надстройки разделывают на металлолом.

При утилизации списанных судов возможны различные варианты технологических процессов их разделки на металлолом. В зависимости от выбранного варианта судоразделки различны и возникающие при этом экологические проблемы, а также возможные пути их решения.

В настоящее время экологически безопасная утилизация судов и кораблей является общемировой проблемой. Выпуск судов мирового флота достиг максимума в 70-е годы прошлого века, в частности в 1977 году прирост общего тоннажа составил 394 млн рег. тонн. Возраст этих судов в настоящее время приближается к (30…40) летнему рубежу. Многие из них уже списаны и утилизированы. В 1985 году масса переработанного судового лома составила 45 млн тонн. В первой половине 90-х годов в среднем ежегодно перерабатывалось около (50…60) млн тонн, а в период с 2000 по 2015 гг. ожидается получать от 60 до 100 млн тонн судового лома в год.

Переработка судового лома осуществляется во многих регионах мира. Наиболее развита она в странах Дальнего Востока и Индокитая: Индии (до 60% всей массы лома), Китае, Южной Корее, Пакистане и др. Это объясняется стабильно высокими в этом регионе ценами на судовой лом – до (100…120) дол. США за тонну. Экономическими предпосылками для этого являются:

- высокий спрос на чёрный металл в таких странах, как Япония, Китай, Южная Корея, Индия;
- наличие дешёвой рабочей силы;
- большая протяжённость береговой линии, выделяемой для разделки судов;
- благоприятные климатические условия;
- отсутствие жёстких законов, препятствующих загрязнению окружающей среды.

Кроме упомянутых стран, разделка судов на лом производится также в Африке (Либерия) и Европе (Испания, Великобритания). О важности этой проблемы говорит тот факт, что ассоциация японских судовладельцев и японское общество судостроителей создали объединённый комитет по исследованию утилизации старых судов.

В Черноморском регионе разделка судов выполняется в Турции, Румынии и Украине. По данным источника [1] сырьевой потенциал судов и кораблей только России составляет более 1000 единиц, общим тоннажём порядка 3 млн. тонн. Только при их утилизации могут быть получены более 2 млн. тонн лома чёрного металла, более 170 тыс. тонн лома цветных металлов, а также другие материальные ценности. Однако в связи с экономическим кризисом 2008 года и последующим спадом производства в Европе спрос на чёрный металл и металлопрокат снизился, соответственно упал и спрос на лом чёрных металлов.

Несмотря на мировые экономические кризисы 1998 и 2008 гг. и их последствия для ведущих экономик мира поставки лома из России и Украины значительно выросли. Так, экспорт чёрного лома только из Украины вырос с 312 тыс. тонн в 1995 году до 3 млн. тонн в 2010 году. В результате цены на лом чёрных металлов, например, на турецком рынке – основном рынке сбыта украинского металлолома – резко упали и продолжают стабильно снижаться до (50…55) дол. США за тонну. В этих условиях выдержать конкуренцию российским поставщикам лома возможно лишь в том случае, если стоимость порезки 1 тонны судового лома составит не более (15…20) дол. США. В дальнейшем, при сохранении существующих тенденций, стоимость порезки лома должна быть снижена до (9…12) дол. США за тонну. Достичь таких показателей воз-

можно применением новых, более производительных методов и способов резки, новых технологических и организационных решений.

Существует несколько организационно-технологических схем разделки судов на лом. В странах Юго-Восточной Азии, Дальнего Востока и Африки нашла широкое применение следующая схема: во время прилива судно на полном ходу выбрасывается на пологий берег. Затем большим числом рабочих его демонтируют и разделывают на металлолом. Резка производится с помощью компактного оборудования (в основном ручными газовыми резаками). При демонтаже используют подъёмные краны и лебёдки. Утилизация одного судна массой (1,5…2,0) тыс. тонн выполняется в среднем за 4 месяца, крупнотоннажного (массой более 2,0 тыс. тонн) – за 1 год. Последующая обработка скрапа (лома) осуществляется на металлургических заводах.

В развитых странах Дальнего Востока (Тайвань, Южная Корея), в Европе и Соединённых Штатах Америки демонтаж судна и порезку корпуса выше ватерлинии производят на плаву у стационарной причальной стенки. Корпус разрезают на крупные секции, которые передаются краном на сушу для дальнейшей переработки. Оставшуюся часть судна поднимают на берег, где её также разрезают в товарный лом газовыми резаками. Переработку на лом крупных секций осуществляют с помощью механической резки. Благодаря такой схеме утилизация крупнотоннажного судна, например, на Тайване производится всего за (1,5…2) месяца.

Единственная на постсоветском пространстве специализированная судоразделочная база (находится в Украине) использует вторую схему судоразделки. Однако процент механической резки здесь значительно ниже, чем на предприятиях Тайваня, Южной Кореи и США, ниже и мощность применяемого кранового оборудования. Кроме того, применяемое для газовой резки оборудование значительно более громоздко, что увеличивает потери времени на вспомогательные операции.

В связи с отсутствием загрузки по основному производству разделкой судов в последнее время стали заниматься и ранее специализировавшиеся на судоремонте судоремонтные предприятия. Они разнообразили существующие организационно-технологические схемы утилизации судов. Так, например, на ГАХК «Черноморский судостроительный завод» оставшаяся часть судна поднимается на берег с помощью двух 900-тонных козловых кранов; прорабатывается и вариант подъёма оставшейся части судна на продольный наклонный стапель. Тяговое усилие при этом будет создаваться с помощью лебёдок и (или) тех же козловых кранов.

В Японии, США и ФРГ запатентован способ порезки судна полностью на плаву, позволяющий измерять и регулировать величины напряжений, возникающих в плоскости реза.

В России, где имеется большое количество судов по берегам рек или в затонах, находящихся в полузатопленном состоянии, которые невозможно разделать традиционными методами, возникли новые организационно-технологические схемы судоразделки: создаются мобильные бригады, оснащённые автомобильным транспортом с необходимым оборудованием, или плавучие судоразделочные базы, оснащённые крановым оборудованием и соответствующими вспомогательными плавсредствами. Предложен способ разделки судов, особенно притопленных, на крупные секции с помощью энергии направленного взрыва с дальнейшей погрузкой секций на баржи или на другие плавсредства и транспортировкой их на стационарную судоразделочную базу для дальнейшей переработки.

Таким образом, при разделке судов на лом принципиально может использоваться любая из рассмотренных организационно-технологических схем. Выбор же той или иной конкретной схемы судоразделки главным образом зависит от архитектурно-конструктивного типа утилизируемого судна.

Ниже приведены и рассмотрены с точки зрения утилизационной пригодности схемы основных типов разделываемых на лом самоходных судов: сухогрузных; наливных; пассажирских и судов технического флота.

Так можно выделить четыре конструктивных типа сухогрузов, различающихся наличием или отсутствием накрывающих палубных конструкций, наличием и наклоном вторых бортов, доступностью для резки междудонных конструкций. Для удобства анализа основные типы и конструктивные особенности сухогрузных судов сведены в табл. 1, а их схемы приведены на рис. 1 (*а – г*).

Таблица 1

Характеристика конструктивных типов сухогрузных судов

Тип судна	Наименование схемы	Характеристика конструктивных особенностей
Бункерное	Рис. 1, *а*)	Один (редко несколько) открытый трюм-бункер, вертикальные борта, наклонные вторые борта, бак
Трюмное	Рис. 1, *б*)	Наличие более двух трюмов, наличие люковых закрытий, полное раскрытие трюмов, вертикальные наружные и вторые борта, плоское днище, бак
Судно-площадка	Рис. 1, *в*)	Отсутствие трюмов, сплошная гладкая палуба без крупных вырезов, вертикальные борта, плоское днище
Тентовое судно	Рис. 1, *г*)	Сплошная гладкая палуба без крупных вырезов, лёгкая надстройка для размещения грузов, имеющая верхние и боковые лацпорты, вертикальные борта, плоское днище

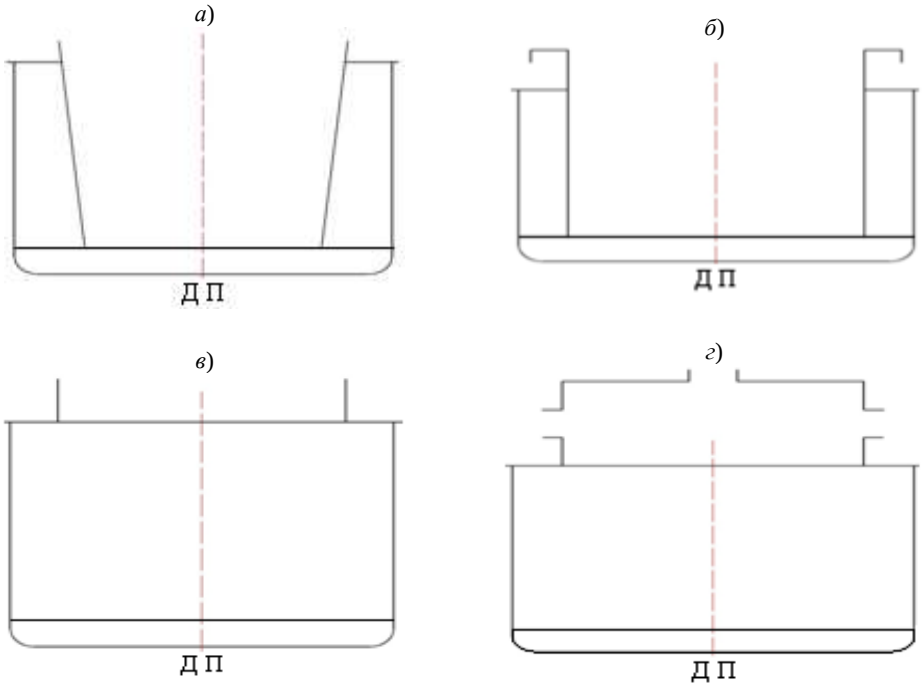


Рис. 1. Конструктивные типы сухогрузных судов:
а) бункерное; *б*) трюмное; *в*) судно-площадка; *г*) тентовое

Наливные суда условно также можно разделить на четыре группы: гладкопалубные, тронковые и с вертикальными и горизонтальными вставными ёмкостями. Для удобства их анализа и по аналогии с сухогрузными судами основные типы и конструктивные особенности наливных судов сведены в табл. 2, а их схемы приведены на рис. 2 (*а–в*) [2].

Таблица 2

Характеристика конструктивных типов наливных судов

Тип судна	Наименование схемы	Характеристика конструктивных особенностей
Гладкопалубное	Рис. 2, *а*)	От 2-х до 8-и танков, гладкая палуба без крупных вырезов, имеются бак и (или) ют, сплошная продольная переборка в ДП, вертикальные наружные и вторые борта, плоское днище
Тронковое	Рис. 2, *б*)	От 2-х до 4-х танков, тронковая палуба без крупных вырезов, имеются бак и (или) ют вертикальные наружные и вторые борта, плоское днище
Со вставными ёмкостями	Рис. 2, *в*)	2-е – 4-е вертикально расположенные оболочки большого диаметра, имеются бак и (или) ют, вертикальные вторые борта, плоское днище
С вкладными ёмкостями	Рис. 2, *г*)	1-а – 3-и горизонтально расположенные оболочки большого диаметра, имеются бак и (или) ют, вертикальные вторые борта, плоское днище

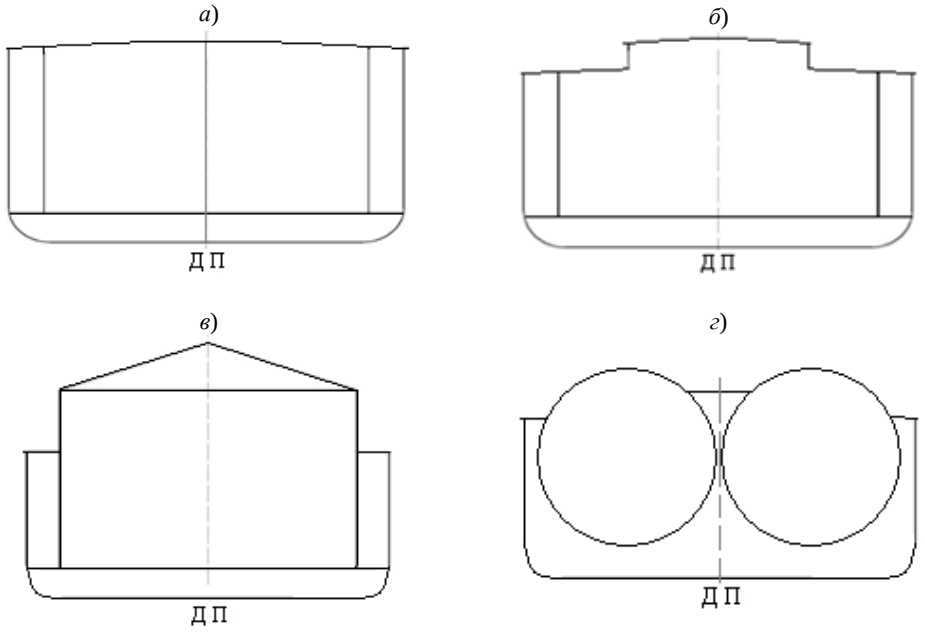


Рис. 2. Конструктивные типы наливных судов:
а) гладкопалубное; *б*) тронковое; *в*) со вставными ёмкостями; *г*) с вкладными ёмкостями

Утилизируемые пассажирские суда, как правило, представляют собой сложные объёмные конструкции с наклонными бортами и килеватостью, без вторых бортов и второго дна, с одно- или многоярусной надстройкой, протяжённостью не менее 2/3 длины судна (см. рис. 3).

Разделке подлежит и значительное количество судов буксирного флота – буксиров и толкачей. Конструктивно они представляют собой плоскодонные (или с незначительной килеватостью) суда с вертикальными бортами и гладкой (или со стандартной седловатостью) палубой с крупным вырезом в средней части (в р-оне машинного отделения). В средней же части. Как правило, расположена 1–3-х ярусная надстройка. Схема корпуса буксирного судна в миделевом сечении проиллюстрирована схемой, приведённой на рис. 4.

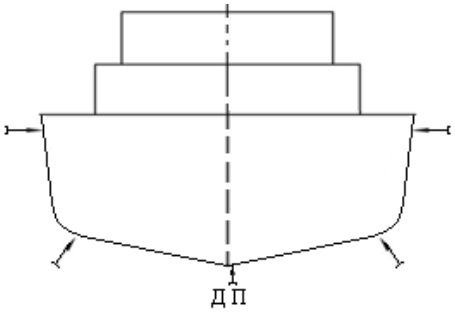


Рис. 3. Схема пассажирского судна.
Стрелками показан вариант арзделения корпуса на секции

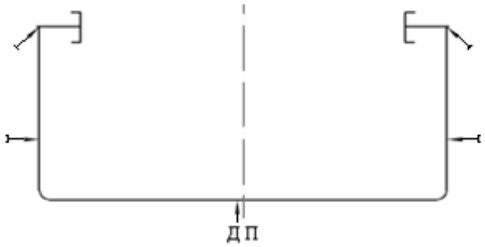


Рис. 4. Схема корпуса буксирного судна в миделевом сечении.
Стрелками показан вариант разделения корпуса на секции

Отдельную категорию утилизируемых судов составляют несамоходные суда: сухогрузные и наливные. Их конструктивные особенности, так же как и у самоходных, обусловлены наличием двойных бортов и двойного дна, что значительно усложняет и удорожает процесс судоразделки. На рис. 5 показаны основные конструктивные типы несамоходных судов. Приведённые схемы достаточно ясно характеризуют конструктивные особенности судов данной категории и в отдельных комментариях не нуждаются.

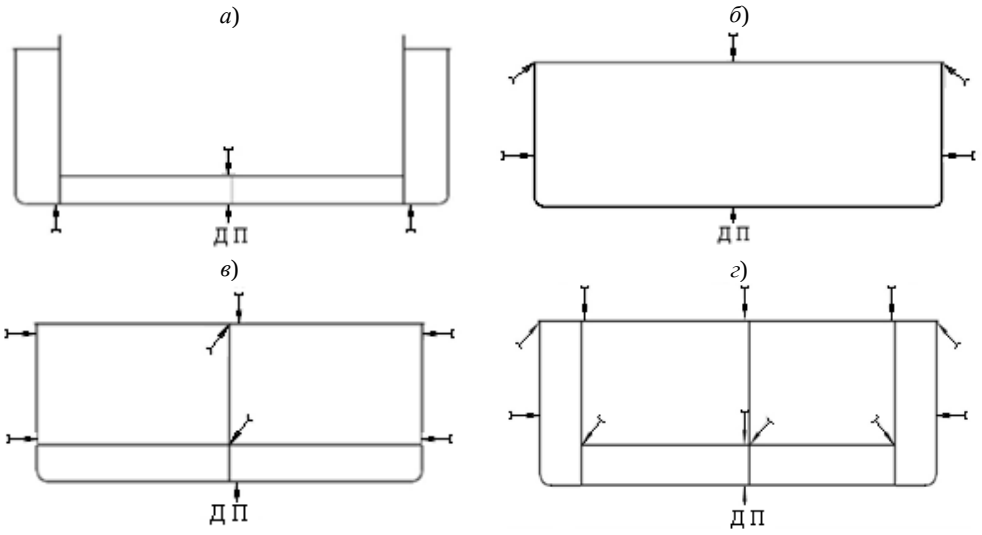


Рис. 2. Конструктивные типы несамоходных судов:
а) с вторым дном и вторыми бортами трюмного типа; б) гладкопалубное без второго дна и вторых бортов; в) с вторым дном без вторых бортов; г) гладкопалубное с вторым дном и вторыми бортами и продольной переборкой в ДП

Исходя из приведённых сведений наиболее «перспективными» с точки зрения первоочередной утилизации в настоящее время следует считать суда следующих проектов: речные сухогрузные суда пр. 576 (типа «Шестая пятилетка») и пр. Р-168; суда-площадки пр. Р-86А и их модификации пр. 81110.

Ниже приведена выборочная характеристика судов указанных проектов.

Суда типа «Шестая пятилетка» – средние сухогрузные суда, имеющие четыре трюма с люковыми закрытиями, с двойным дном, с машинным отделением и надстройкой в кормовой части. В процессе эксплуатации некоторые суда были оборудованы носовыми упорами для толкания баржевых секций, затем на большинстве судов упоры были сняты. Суда данного проекта неоднократно модернизировались с частичной заменой оборудования и ходовых рубок. Водоизмещение составляет 2072 т. Главные размерения: дина – 93,75 м; ширина – 13,22 м; осадка – 2,8 м; высота борта –4,8 м. Завод-строитель – «Завод «Красное Сормово» (СССР, г. Горький). Годы постройки – 1957–1959.

Речные сухогрузные суда трюмного типа пр. Р-168 представляют собой сухогрузные двухвинтовые теплоходы с надстройкой и рулевой рубкой в носовой части и машинным отделением в корме, с одним трюмом, расположенным между надстройкой и машинным отделением, с двойным дном и двойными бортами, с термоизоляцией трюма. Назначение теплохода – перевозка овощей, фруктов, тарноштучных и пакетированных грузов, зерна, контейнеров, лесоматериалов. Класс Российского Речного Регистра: «О-ПР (лёд)». Основные характеристики: Водоизмещение – 2072 т; длина – 84 м; ширина – 12,3 м; осадка – 2,5 м; высота борта – 3,5 м; завод-строитель – ССРЗ «им. 40-ой годовщины Октября» (СССР, Горьковская обл., пос. Октябрьский).

Средние мелкосидящие сухогрузные суда-площадки, с двойными бортами и двойным дном, с машинным отделением и надстройкой в кормовой части предназначались, в основном, для перевозки насыпных и навалочных грузов. Некоторые суда были дооборудованы для работы с баржей-приставкой. Первоначальный проект Р-86А, его дальнейшая модификация – проект 81110, отличающийся увеличенной грузоподъёмность и видоизменённой надстройкой. Завод-строитель – «Шиморский ССЗ» (СССР, Горьковская обл., пос. Шиморское). Основные характеристики пр. Р-86А: длина – 80,8 м; ширина – 15,25 м; высота борта – 2,0 м; осадка –1,4 м.

Речные баржи-площадка пр. 81100 предназначены для перевозки навалочных и тяжеловесных грузов, техники. Класс Российского Речного Регистра: «О (лёд)». Основные характеристики судов: длина – 80,8 м; ширина – 15,25 м; высота борта – 2,0 м; осадка – 1,4 м.

Резюмируя изложенное, необходимо отметить три важных обстоятельства.

1. Проблема утилизации судов, выработавших свой эксплуатационный ресурс, является очень острой и требует рациональных решений по всему комплексу организационных и технических вопросов.

2. Необходимо упорядочение процедур утилизации судов и создание соответствующей национальной нормативной базы.

3. Необходимо создание национального банка данных по судам, подлежащим утилизации с всесторонним их анализом и разработкой типовых технологий утилизации.

Список литературы

[1] Перов В.Н. Технология утилизации судов: Учебное пособие / В.Н. Перов. – Николаев: УГМТУ, 2002. – 24 с.

[2] Роннов Е.П. Проектирование судов экологического назначения: Методическое пособие / Е.П. Роннов. – Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2004. – 45 с.

ANALYSIS OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL PARTICULARS OF RIVER AND RIVER-SEA VESSELS TO BE UTILIZED

S.V. Studnev, T.A. Mikheeva, E.G. Burmistrov

The problem of utilizing both physically and morally obsolete river and river-sea vessels is considered. Results of analysis are given of existing architectures and structures of vessel types to be utilized from the point of view of their utilization suitability.

УДК 629.12:532.5

В.Н. Блохин, *главный конструктор, ОАО «ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева»*
В.М. Прохоров, *зам. главного конструктора, ОАО «ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева»*
603003, г. Нижний Новгород, ул. Свободы, 51
П.С. Кальясов, *инженер-конструктор, ООО «СК АЭРОХОД»*
А.К. Якимов, *инженер-конструктор, ООО «СК АЭРОХОД»*
А.М. Крыжанов, *инженер-конструктор, ООО «СК АЭРОХОД»*
603003, г. Нижний Новгород, ул. Щербакова, 37Е.
А.В. Туманин, *аспирант, ФГОУ «ННГУ им Н.И. Лобачевского»,*
В.В. Шабаров, *канд. тех. наук, доцент, «ННГУ им Н.И. Лобачевского»*
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКРАНОПЛАНА НА КРЕЙСЕРСКОМ РЕЖИМЕ ДВИЖЕНИЯ

В статье изучены возможности применения современных суперкомпьютерных технологий для определения аэродинамических характеристик экранопланов. Изложена методика вычислительного эксперимента, основанная на прямом решении осредненных уравнений Навье-Стокса турбулентного движения несжимаемой жидкости. Проведены расчеты обтекания экраноплана с последующим сопоставлением полученных результатов по аэродинамическим характеристикам с результатами физического эксперимента: продувками модели в аэродинамической трубе АТ-2.
Ключевые слова: аэродинамические характеристики, экраноплан, вычислительный эксперимент, ANSYS CFX

Введение

В работе оцениваются возможности технологий вычислительного эксперимента, базирующегося на прямом решении осредненных уравнений Навье-Стокса турбулентного течения вязкой несжимаемой жидкости, для определения АДХ экранопланов. Решение задачи аэродинамического обтекания экраноплана методами вычислительной гидродинамики (CFD) в литературе не известно. Поэтому в статье изложены физическая и математическая постановки задачи. Рассмотрены и сопоставлены различные способы моделирования экрана: метод зеркального отображения, методы подвижного и неподвижного экрана.

В качестве объекта вычислительных экспериментов выбрана аэрогидродинамическая компоновка морского пассажирского экраноплана (МПЭ), разработанная в ОАО «ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева». Модель МПЭ продувалась в аэродинамической трубе АТ-2 филиала №1 ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова в 1992 г. Возможности вычислительного эксперимента оценивались, в первую очередь, сравнением результатов математического моделирования с результатами продувок, как по продольным, так и по боковым АДХ. Кроме того, возможности вычислительного эксперимента по исследованию аэродинамики экраноплана иллюстрируются полями скоростей и давлений при обтекании экраноплана потоком воздуха, а также пространственной картиной линий тока.

1. Постановка задачи

1.1. Физическая постановка задачи

Рассматривается установившийся полет экраноплана на экранном режиме. Влиянием струй двигателей на структуру движения воздуха пренебрегается. Режим те-

чения воздуха всюду считается турбулентным, числа Маха таковы, что влиянием сжимаемости воздуха можно пренебречь. Справедлив принцип обращения движения. Необходимо, определить АДХ экраноплана при различных его положениях относительно вектора скорости набегающего потока и отстояниях до экрана. Под АДХ понимаются безразмерные коэффициенты сопротивления, подъемной и боковой сил, а также безразмерные коэффициенты моментов по крену, скольжению и углу атаки крыла.

1.2. Математическая постановка задачи

Задача ставится в следующих допущениях:

1. Воздух считается несжимаемой жидкостью.

2. Режим течения воздуха турбулентный. Для описания турбулентного характера воздуха справедливы осредненные уравнения сжимаемой вязкой жидкости и гипотеза вихревой вязкости.

3. Массовыми силами пренебрегается.

Математическая модель течения в этом случае включает в себя осредненные уравнения Навье-Стокса и уравнения неразрывности [1]. Для замыкания системы уравнений должна быть привлечена одна из моделей турбулентности, базирующаяся на гипотезе вихревой вязкости.

В численном моделировании для замыкания системы использовалась одна из наиболее применяемых моделей турбулентности – составная модель Ментера (SST) [2]. Составная модель Ментера является комбинацией k-ω и k-ε моделей, причем k-ω (кинетическая энергия турбулентности k, завихренность ω) активизируется вблизи твердых границ потока, а вдали от них активизируется k-ε модель (кинетическая энергия турбулентности k и скорость ее диссипации ε).

Для решений уравнения количества движения и неразрывности должны выставляться граничные и начальные условия. По поводу последних, следует отметить, что в программных комплексах CFD, определение установившегося течения производится в нестационарной постановке, т. е. ищется стационарное решение системы уравнений, включающих в себя уравнение неразрывности, уравнения количества движения и уравнения турбулентной модели. В этом случае роль начальных условий аналогична роли начального приближения, задаваемого при решении нелинейных задач.

Задача обтекания экраноплана относится к внешним задачам аэродинамики и ее решение должно искаться в безграничном объеме жидкости. В методах CFD внешние задачи аэродинамики представляются как внутренние: обтекаемое в неограниченном пространстве тело заключается внутрь области весьма больших, но конечных размеров. На границе обтекаемого тела и дальних границах выставляются граничные условия; если на поверхности модели экраноплана граничные условия очевидны – это условия непротекания и прилипания ($v_x = v_y = v_z = 0$), то на некоторых дальних границах формулировка этих условий вызывает затруднения – дальние граничные условия не должны искажать поле течения вблизи модели экраноплана. Именно поэтому, размеры области, в которую заключают модель экраноплана выбираются относительно большими – на всех дальних границах возмущения, вносимые в поток моделью экраноплана, должны диссипировать.

Расчетная область, в которой решается задача обтекания модели экраноплана, представлена на рис. 1. и представляет собой объем пространства в виде параллелепипеда *ABCDEFGK*, внутри которого находится модель экраноплана 6. Геометрические размеры модели *6* приняты равными размерам физической модели экраноплана МПЭ, используемой в продувках в аэродинамической трубе АТ-2. На входной границе 1 (грань *ABCD*) задаются величина и направление скорости обтекания $v_y = v_z = 0$, $v_x = 40\,м/с$ – величина скорости принята равной продувочной скорости в аэродинамической трубе АТ-2. На верхней *(FGCB)* и фронтальной боковой (*EFBA*) гранях 2

задается граничное условие равенства нулю избыточного давления $p = 0$; при этом через эти грани допускается вход-выход воздуха в расчетную область.

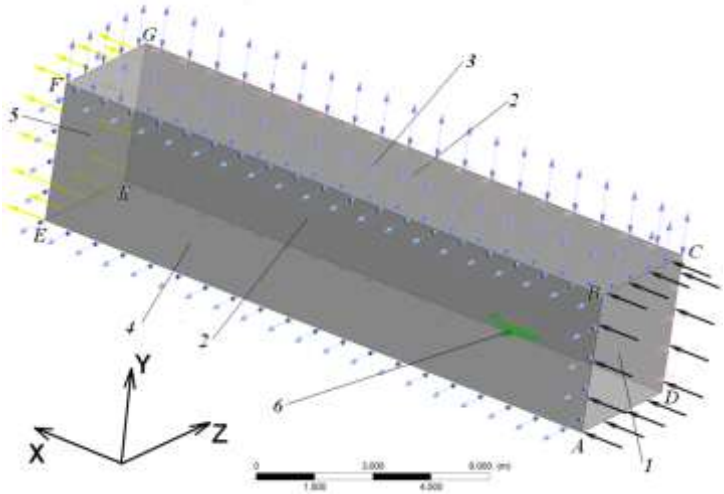


Рис. 1. Расчетная область для решения задачи обтекания модели экраноплана

Такой тип граничных условий в программном комплексе ANSYS CFX называют открытыми (opening). При расчете продольных АДХ в вычислительных экспериментах рационально рассматривать только ½ модели экраноплана, отсекаемую диаметральной плоскостью. При этом на диаметральной плоскости 3 (грань *KGCD*) выставляются граничные условия симметрии (symmetry)

$$v_z = 0\,,\ \frac{\partial p}{\partial z} = 0\,.$$

Отметим, что компоненты скорости v_y и v_z при этом в общем случае отличны от нуля на *3* и определяются в процессе решения задачи. В несимметричном случае, характерном для определения боковых АДХ (обтекание со скольжением, обтекание накрененной модели), рассматривается полная модель экраноплана, условие симметрии снимается и на тыльной стороне параллелепипеда ставится условие открытой свободной границы *2*.

На нижней грани параллелепипеда 4 (грань *EKDA*) ставится одно из условий моделирования экрана. В численном моделировании оказалось возможным обеспечить математически все три известных физических метода моделирования экрана:

1. Метод зеркального отображения – обеспечивается заданием условия симметрии на экране (грань *EKDA*) в виде

$$v_y = 0\,,\ \frac{\partial p}{\partial y} = 0\,.$$

При этом компоненты скорости v_x и v_z отличны от нуля на *EKDA*.

2. Наиболее корректный метод моделирования экрана – подвижный экран – обеспечивается заданием на экране граничного условия подвижной стенки (slip wall). В этом типе граничного условия нормальная к стенке и поперечная (z-ая) компоненты скорости обращаются на стенке в нуль ($v_y = v_z = 0$), а сама стенка движется со скоростью потока воздуха $v_x = 40\,м/с$ на входной границе *1*.

3. Метод неподвижного экрана – обеспечивается заданием условия прилипания и непротекания на неподвижной стенке (экране) в виде $v_x = v_y = v_z = 0$. Как известно, достоинством этого способа в физическом трубном эксперименте является простота его реализации, а недостатком – наведенный неподвижным экраном «ложный» пограничный слой.

На грани параллелепипеда *EFGK – 5* (см. рис. 1.1) – ставится выходное граничное условие (outlet) в виде равенства избыточного давления воздуха на *5* нулю ($p = 0$). По условию outlet воздух может только выходить из расчетной области через указанную грань.

На поверхности модели экраноплана *6* ставится очевидное граничное условие непротекания и прилипания $v_x = v_y = v_z = 0$.

Модель экраноплана в расчетной схеме, представленной на рис.1, располагается не на одинаковых расстояниях от входной 1 и выходной 5 границ. Такое расположение связано с распространением возмущений при обтекании модели вниз по потоку: на основании накопленного опыта расчетов обтекания тел несжимаемым турбулентным потоком воздуха рекомендуется располагать модель таким образом, чтобы от ее миделя до входной границы было примерно 20% продольного размера расчетной области, соответственно 80% до выходной границы.

Размеры модели экраноплана и расчетной области: *AB*=3,8 м, *AE*=16,5 м, *AD*=3,8 м, максимальный продольный размер модели экраноплана *L*=1,46 м, максимальный поперечный размер модели экраноплана *B*=1,08 м, максимальная высота модели экраноплана *H*=0,33 м.

Для задачи симметричного обтекания сеточная модель состоит из 2.8 млн. конечных объемов. Максимальное число конечных объемов на этапе отладки задачи достигало примерно 9 млн.

2. Результаты расчета АДХ и их сравнение с результатами продувок

Моделируется обтекание модели МПЭ в аэродинамической трубе с открытой рабочей частью при использовании метода подвижного экрана. Расчеты продольных АДХ осуществлялись на модели с неотклоненными органами управления для $\bar{h}$, равных 0.15, 0.2, 0.23, 0.27, 0.33 и 0.43 при углах атаки α, равных 2º, 3º, 4º и 6º.

Время расчета одного варианта приблизительно равно 5-6 часов при вычислениях на персональном компьютере на базе 4-х ядерного процессора Intel® Core™ 2 с частотой 2.83ГГц и оперативной памятью 8 ГБ под управлением 64-х разрядной операционной системой Windows XP Professional. Численный счет осуществлялся при распараллеливании задачи на три ядра.

По результатам расчетов на различных высотах $\bar{h}$ и различных углах атаки α получены зависимости продольных АДХ – безразмерного коэффициента сопротивления c_x, безразмерного коэффициента подъемной силы c_y и безразмерного коэффициента продольного момента m_z. На рис. 2 сопоставлены результаты вычислительного и физического экспериментов в виде зависимости от $\bar{h}$ безразмерных АДХ c_x, c_y и m_z на крейсерском угле атаки. На рис. 3 приведены аналогичные зависимости от углов атаки α на крейсерской высоте полета. Результаты вычислительных и физических экспериментов представлены в скоростной системе координат [3].

Относительное рассогласование расчетных результатов с данными продувок во всем исследованном диапазоне высот и углов атаки не превышает 7%, 6% и 10% для

c_x, c_y и m_z соответственно. На рис. 4 для иллюстрации возможностей вычислительного эксперимента в экранной аэродинамике показаны поля давления на верхней и нижней поверхностях модели (а) и экране (б).

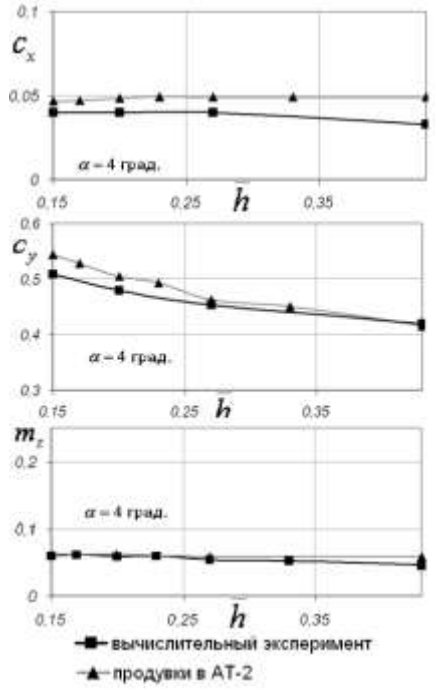


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные зависимости от относительного отстояния до экрана продольных АДХ на угле атаки $\alpha = 4°$

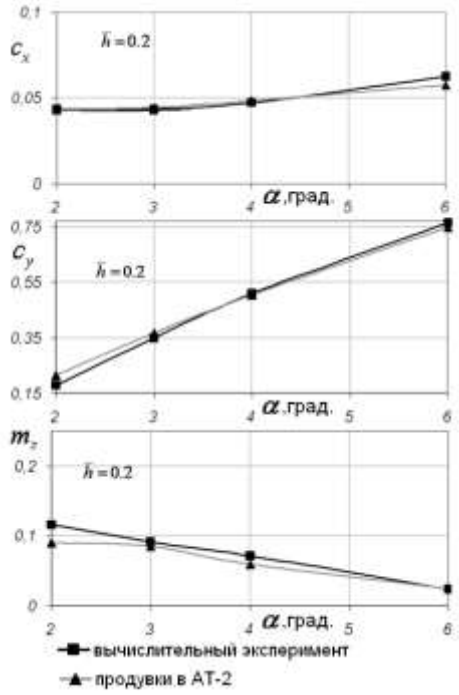


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные зависимости от угла атаки продольных АДХ на относительной высоте $\bar{h}$ =0.2

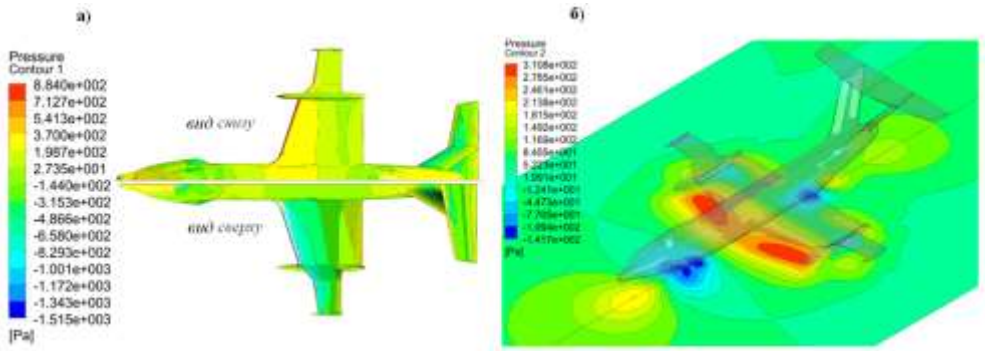


Рис. 4. Поля избыточных давлений на модели экраноплана (а) и экране (б) на режиме полета $\alpha = 4°$ и $\bar{h}$ =0,15

Достоинством вычислительного эксперимента является возможность определять интегральные и распределенные аэродинамические нагрузки на любом элементе компоновки с учетом интерференции с другими элементами. Поля давлений, показанные на рис. 8, позволяют утверждать, что местная аэродинамика корпуса МПЭ в районе

кабины пилотов и сразу за центропланом не отработана: наблюдаются зоны с отрицательными избыточными давлениями – экран «притягивает» указанные элементы компоновки.

При серийных расчетах режимов со скольжением и креном число элементов расчетной сетки составляло 4,7 млн конечных объемов. Время расчета одного варианта приблизительно равно 14–15 часам при счете на указанных выше компьютерах и распараллеливании задачи на три ядра.

Результаты вычислительного эксперимента и продувок по безразмерным коэффициентам боковой силы c_z, момента крена m_x, момента рыскания m_y в зависимости от угла крена γ сопоставлены на рис. 5, а в зависимости от угла скольжения β – на рис. 6. И в том, и в другом случае представленные результаты соответствуют крейсерскому режиму полета – углу атаки $\alpha = 4°$ и безразмерной высоте $\bar{h}$ =0,2. Результаты расчетов и продувок представлены в полусвязанной системе координат [3].

Рассогласование результатов физического и вычислительного эксперимента в боковых АДХ по крену (рис. 9) связано с отсутствием геометрической симметрии зеркальных моделей в продувках, поскольку динамометрические весы фиксируют значимые величины, в первую очередь, боковой силы и моментов крена при отсутствии углов крена и скольжения.

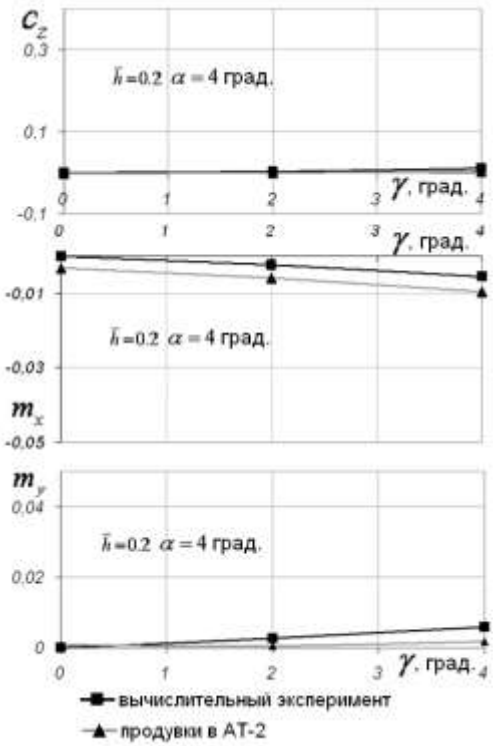


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные зависимости боковых АДХ от угла крена на крейсерском режиме полета

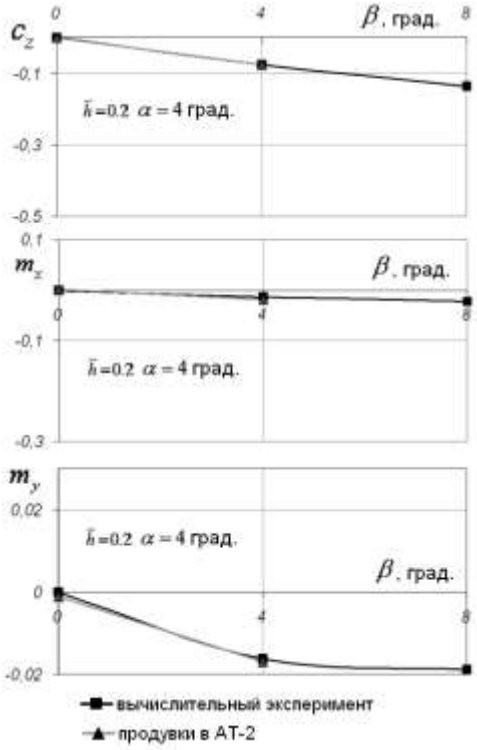


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные зависимости боковых АДХ от угла скольжения на крейсерском режиме полета

На рис. 7 показаны линии тока воздуха при косом обтекании модели экраноплана с углом скольжения $\beta = 8°$ на крейсерском режиме полета. Видна разница вихревых структур на левой и правой консолях крыла, а также не симметрия обтекания киля. Интенсивные вихри формируются в районе стыковок центроплана и консолей крыла:

этот результат свидетельствует о неоптимальном распределении давлений по размаху составного крыла МПЭ.

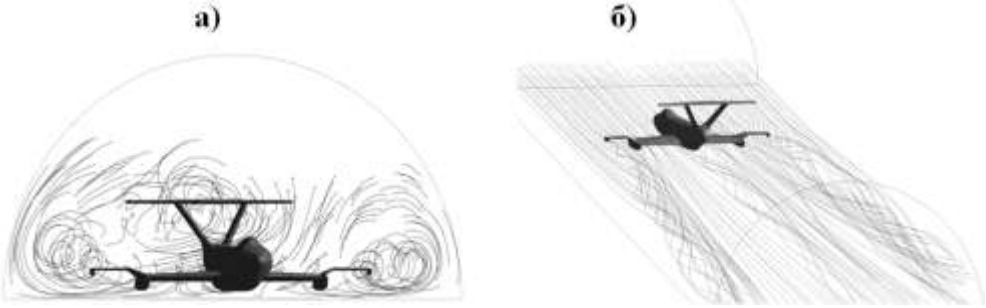


Рис. 7. Линии тока на режиме с $\bar{h} = 0{,}2$, $\beta = 8^{\circ}$ и $\alpha = 4^{\circ}$
(а – вид с носа, б – вид с кормы)

3. Заключение

В рамках технологий вычислительного эксперимента разработаны основы методики для определения АДХ экраноплана при его обтекании турбулентным потоком вязкой несжимаемой жидкости. Разработанная методическая часть позволяет определять АДХ экраноплана как в безграничном потоке, так и при моделировании обтекания экраноплана в аэродинамической трубе при разных способах имитации подстилающей поверхности.

С использованием технологий вычислительного эксперимента проведено предварительное исследование влияния границ аэродинамической трубы на структуру течения и АДХ модели экраноплана. Результаты этого исследования показывают, что АДХ модели экраноплана, полученные по продувкам в аэродинамической трубе, могут нести искажения вследствие взаимодействия возмущений воздуха при обтекании модели со стенками трубы и, через открытую рабочую часть, с внешним по отношению к трубе объемом воздуха. Полученные вычислительными экспериментами результаты показывают основные тенденции этого искажения: завышение коэффициента подъемной силы в аэродинамической трубе в сравнении с коэффициентом подъемной силы в безграничном потоке и завышение скосов потока, обусловленных эффектом экрана, на горизонтальном оперении.

Проведена серия вычислительных экспериментов по определению продольных и боковых АДХ модели экраноплана МПЭ. Результаты этих экспериментов удовлетворительно согласуются с результатами продувок модели экраноплана МПЭ в аэродинамической трубе АТ-2. Имеющее место расхождение в результатах на данном этапе можно считать приемлемым.

Опыт применения современных суперкомпьютерных технологий для исследования аэродинамики экранопланов показывает перспективность этого направления в решении научных и проектных задач по выбору и совершенствованию аэрогидродинамических компоновок экранопланов.

Список литературы

[1] Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991.
[2] Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005.
[3] И.В. Остославский, И.В. Стражева. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. М., Машиностроение, 1969.

THE APPLICATION OF COMPUTER SIMULATION FOR THE ESTIMATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF WIG ON CRUSING REGIME

V.N. Blokhin, V.M. Prokhorov, P.S. Kalyasov, A.K. Yakimov, A.M. Kryzhanov, A.V. Tumanin, V.V. Shabarov

The article explored the application of supercomputing technologies to determine the aerodynamic characteristics of WIGs. The technique presented of computer simulation, which based on direct solution of the averaged Navier-Stokes equations of turbulent motion of an incompressible fluid. The calculations performed of the flow WIG with a comparison of the results of aerodynamic characteristics with the results of physical experiments in a wind tunnel AT-2.

Keywords: aerodynamic characteristics, WIG , numerical experiment, ANSYS CFX

УДК 629.12.004.67

А.М. Борисов, *доцент ФБОУ ВПО «ВГАВТ»*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 5а

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНОМ КОРПУСА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ДОКА ПРОЕКТА Д600

В современных условиях значительное количество транспортных и стоечных судов, имеющих срок эксплуатации 40–50 лет и более нуждается в ремонте наиболее изношенной подводной части корпуса, ремонт которой может производиться традиционными в судоремонте методами на слипе с использованием судоподъемных средств или в доке. В результате длительной эксплуатации нуждаются в ремонте подводной части корпуса и металлические доки, ремонт которых также связан с использованием судоподъемных средств или доков больших размеров.
Для расширения судоремонтной базы и выполнения ремонта изношенной подводной части корпуса дока без использования судоподъемных средств на кафедре сопротивления материалов, конструкции корпуса и строительной механики корабля ФБОУ ВПО «ВГАВТ» разработана конструкция железобетонного усиления корпуса металлического дока проекта Д 600 грузоподъемностью 600 т на плаву при минимальных затратах материалов и средств, позволяющая продлить срок эксплуатации дока на 20 лет.

Актуальность проводимых на кафедре сопротивления материалов, конструкции корпуса и строительной механики корабля ФБОУ ВПО «ВГАВТ» исследований заключается в том, что в современных условиях значительное количество транспортных и стоечных судов имеют срок эксплуатации 40–50 и более лет и нуждается в ремонте наиболее изнашиваемой подводной части корпуса для продления их эксплуатации. Замена изношенных металлоконструкций подводной части корпуса на новые связана с большой трудоемкостью ремонтных работ, выполняемых в доке или на слипе с использованием судоподъемных средств, и требует значительных затрат материалов и средств.

В то же время в результате длительной эксплуатации нуждаются в ремонте подводной части корпуса и металлические доки, ремонт которых также связан с использованием судоподъемных средств или доков больших размеров. Кроме этого, при выводе металлических доков из эксплуатации для их ремонта сокращается судоремонт-

ная база отрасли вцелом, поскольку при этом занимаются дополнительные стапельные места.

Проведенные по заданию ОАО «ЛОРП» исследования показывают, что в результате усиления железобетоном (ЖБУ) внутренней поверхности изношенного корпуса металлического дока СМД-10 проекта Д 600 создается композитная сталежелезобетонная плита, позволяющая при минимальном расходе металла, стоимости и трудоемкости работ обеспечить необходимую прочность и водонепроницаемость корпуса дока без использования судоподъемных средств, как при выполнении самого ремонта, так и в последующей эксплуатации.

Металлический двухбашенный секционный док СМД-10 класса «✠Р 1,2» построен по проекту Д 600 в 1972 году и к настоящему времени имеет возраст 40 лет. Док СМД-10 является стоечным судном, максимальная грузоподъемность – 600 т, предназначен для производства ремонта подводной части корпусов судов, ремонта движительно-рулевого комплекса, а также дифферентования сухогрузных и нефтеналивных судов грузоподъемностью до 5000 т.

Корпус дока состоит из понтона и двух жестко связанных с ним башен (рис.), выполнен в виде прямоугольника в плане с плоским днищем, бортами и транцами, горизонтальной стапель-палубой, палубой безопасности, топ-палубой и имеет следующие главные размерения: $L \times B \times H_б(H_п) \times T_{гр}(T_п) = 30{,}0 \times 27{,}0 \times 7{,}0(2{,}0) \times 1{,}7(0{,}97)$ м; ширина стапель-палубы – 21,0 м, топ-палубы – 2,5 м; высота башен от стапель-палубы составляет 5,0 м; возвышение палубы безопасности от стапель-палубы – 1,5 м.

Для работы дока в средней части корпуса принят постоянный сухой балласт в количестве 372 т и 8 т укреновочного балласта. Для погружения дока на максимальную глубину 5,5 м принимается жидкий балласт в количестве 1504 т. С учетом остаточного жидкого балласта после всплытия дока общее расчетное количество балласта составляет 782 т, что обеспечивает осадку дока «порожнем» T= 0,97 м.

Система набора корпуса – поперечная, шпация по всему корпусу a = 600 мм, рамная шпация – A = 1200 мм. Понтон дока двумя продольными ступенчатыми и двумя поперечными водонепроницаемыми переборками разделен на девять водонепроницаемых отсеков (см. рис.), в плоскости рамных шпангоутов установлены поперечные раскосные фермы. В отсеке левого борта в средней части корпуса (шп.16-34) размещается насосное отделение, симметрично с правого борта размещается сухой отсек для приема сухого и укреновочного балласта. Остальные семь отсеков используются для приема жидкого балласта.

По результатам дефектации износы днищевой обшивки составляют около 13%, бортов и транцев – 20%, настила стапель-палубы и топ-палубы – 2,5%, переборок балластных отсеков – 10%, износ набора днища и палубы – 15%, борта балластных отсеков – 23%, борта сухих отсеков – 5%. Подводная часть наружной обшивки корпуса дока по всей площади имеет значительный язвенный коррозионный износ с глубиной язв обшивки днища в средней части (2,8–3,2) мм, днища у бортов – до 3,5 мм, обшивки борта и транцев – до 1,5 мм.

Для поддержания корпуса дока с оценкой техсостояния «годное» судовладельцу потребовалось бы выполнить значительный объем судоремонтных работ по корпусу традиционными в судоремонте методами, связанными с заменой изношенных металлоконструкций на новые с использованием судоподъемных средств.

Для обеспечения прочности и водонепроницаемости ЖБУ выполняется с внутренней стороны изношенной подводной наружной обшивки корпуса дока СМД-10 на площади 1038 м^2 (см. рис.), включая днище на площади 810 м^2, борта (120 м^2) и транцы (108 м^2) на высоте 2,0 м от ОП. Остальные связи корпуса находятся в удовлетворительном состоянии и их ремонт, при необходимости, может быть выполнен традиционными в судоремонте методами на плаву без использования судоподъемных средств.

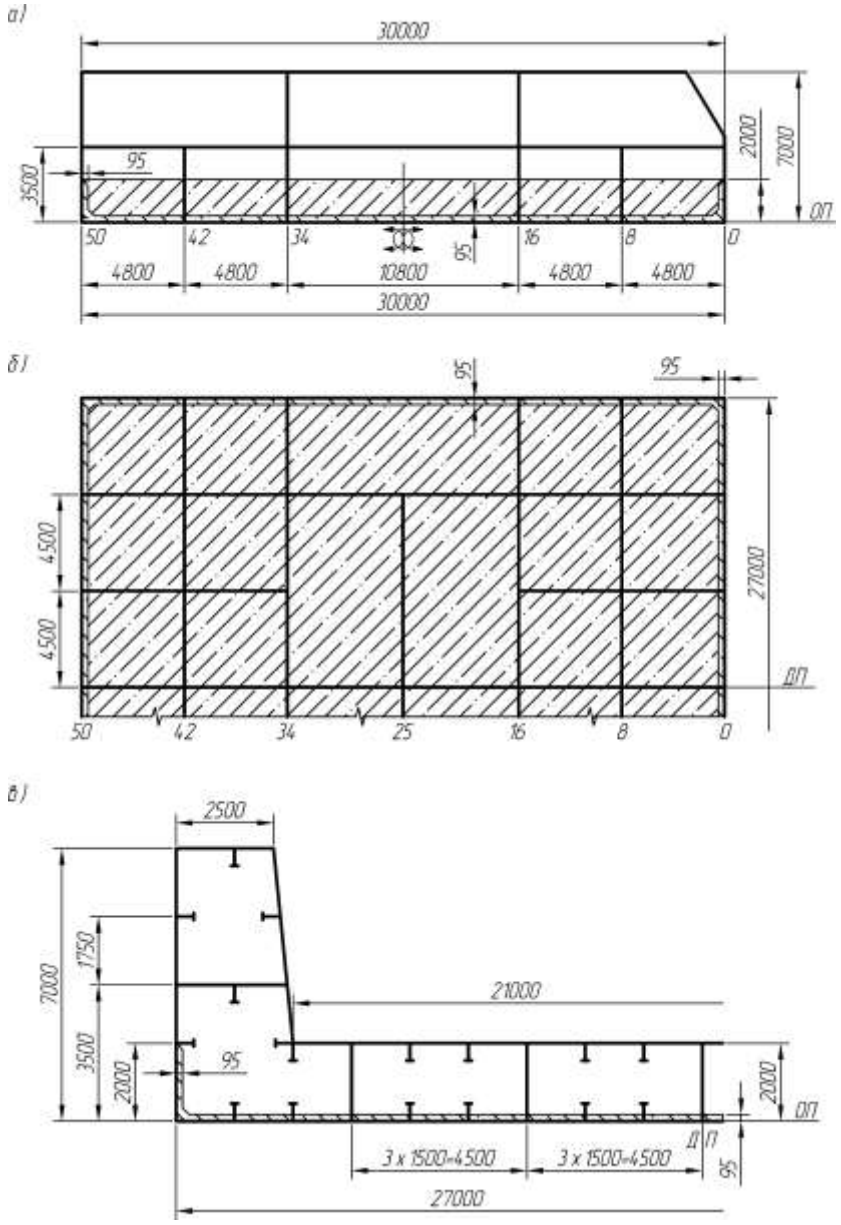


Рис. Размещение ЖБУ в корпусе дока:
а – наружный борт; *б* – днище; *в* – поперечное сечение

Конструкция ЖБУ днища представляет собой композитную плиту, состоящую снаружи изношенной стальной обшивки средней толщиной 6,0 мм и с внутренней стороны – из монолитного армированного судостроительного бетона класса В 30 средней толщиной плиты днища, бортов и транцев – 95 мм, прочно связанных между собой и совместно работающих. При этом обшивка днища рассматривается как листовая арматура, защищающая бетон от повреждений. Поскольку утяжеление корпуса в результате устройства ЖБУ уменьшает прием постоянного сухого балласта на величину утяжеления (257 т) и не лимитирует осадку, то в проекте толщина ЖБУ (h = 95 мм) принята с учетом омоноличивания холостого набора усиливаемой обшивки (∟75x75x7,1), работающего в качестве арматуры отрыва, с обеспечением требуе-

мого защитного слоя. Имеющиеся вмятины на усиливаемой поверхности днища, бортов и транцев допускается не устранять, поскольку ЖБУ в сжатой зоне обеспечивает достаточно высокую устойчивость связей корпуса.

Арматура ЖБУ выполняется в виде сеток, изготовленных в специальном кондукторе и доставленных в корпус через технологические вырезы в настиле стапель-палубы дока, установленных в пределах рамной шпации поверх холостого набора и приваренных к полкам уголков. В сетках применяется стержневая арматура периодического профиля класса А-II (А300) или А-III (А400) диаметром 10 мм, установленная с шагом 100 мм и сваренная в пересечениях. Применение арматуры периодического профиля обеспечивает повышенное сцепление ее с бетоном, прочность и трещиностойкость ЖБУ. Сетки могут собираться в специально изготовленном кондукторе или собираться «россыпью» на месте из отдельных стержней. По контуру рамного набора и переборок стержни сеток соединяются сваркой с монтажной арматурой (диаметром 10 мм или более), приваренной заранее к стенкам связей прерывистым швом.

В стенках рамного набора (флоров и кильсонов) до бетонирования днища для свободного перетекания попавшей в корпус жидкости и последующего ее удаления выполняются голубницы, расположение которых устанавливается с учетом толщины плиты ЖБУ.

Укладка бетона выполняется после очистки ремонтируемых поверхностей от остатков отслаивающейся краски и продуктов коррозии и последующего армирования усиливаемой обшивки. Для бетонирования бортов и транцев после бетонирования днища устанавливается опалубка с соблюдением защитного слоя арматуры. Выполнение каждого этапа по устройству ЖБУ корпуса фиксируется приемо-сдаточным актом.

При отсутствии у заказчика опыта ведения бетонных работ рекомендуется использовать бетон, приготовленный на ближайшем заводе железобетонных конструкций (ЖБК) в соответствии с разработанной в проекте дозировкой составляющих. При этом необходимо учитывать, что время начала схватывания приготовленного бетона – не более одного часа. Бетон должен быть уложен на место в течение не более двух часов после его приготовления. Специализированная лаборатория завода ЖБК должна обеспечить контроль качества приготовленного бетона, которое подтверждается соответствующим сертификатом на каждую партию отпускаемого бетона.

Для дока с ЖБУ корпуса в соответствии с действующими Правилами Российского Речного Регистра (ПРРР) выполнены расчеты общей продольной, общей поперечной и местной прочности с учетом износа связей. Оценка общей прочности выполнена расчетным методом по предельному моменту с определением коэффициента запаса прочности ($K_{пр} = M_{пр}/M_р$) и сравнением его с нормативным. Предельный изгибающий момент $M_{пр}$, МН·м, определяется после выполнения ремонта корпуса и в конце предполагаемого срока службы дока с использованием программ «WINRAVNUS» и «MDW», согласованных с Российским Речным Регистром. Расчетные изгибающие моменты определены алгебраическим сложением моментов на тихой воде с дополнительными волновыми моментами (с учетом возможной транспортировки дока) при общем продольном и общем поперечном изгибе корпуса для наиболее неблагоприятных состояний нагрузки дока в эксплуатации.

За расчетные состояния для дока при общем продольном изгибе приняты: док «порожнем» без балласта ($M_{р.}$= +5,16 МН·м); при прогибе – док «порожнем» с сухим и остаточным жидким балластом ($M_{р.}$= – 3,83 МН·м).

При общем поперечном изгибе за расчетные состояния приняты: при перегибе – док «порожнем» с сухим и остаточным жидким балластом ($M_{р.}$= +5,16 МН·м); при прогибе – док «в грузу» с судном (Q = 600 т) с сухим и остаточным жидким балластом ($M_{р.}$= – 3,83 МН·м).

Результаты выполненных расчетов коэффициентов запаса прочности по предельному моменту для дока с ЖБУ при общем изгибе корпуса приведены в табл.

Таблица

Значения коэффициентов запаса прочности по предельному моменту

Наименование	Общий продольный изгиб		Общий поперечный изгиб	
	прогиб	перегиб	прогиб	перегиб
После выполнения ЖБУ корпуса	15,0	15,0	18,1	22,4
В конце предполагаемой эксплуатации дока	11,8	12,5	12,8	11,8

Полученные коэффициенты запаса прочности по предельному моменту после выполнения ЖБУ корпуса значительно превышают нормативное значение коэффициента для условно нового судна (k = 1,35) и в конце предполагаемой эксплуатации дока ($K_{\text{годн}}$ = 1,15). После усиления железобетоном корпус дока обладает большим запасом прочности. Поэтому по расчетам общей продольной прочности док может эксплуатироваться в течении последующих 30 лет с оценкой техсостояния «годное».

Однако, фактические скорости износа связей корпуса в последующей эксплуатации могут быть меньше рекомендуемых ПРРР, что идет в запас прочности. Поэтому по истечении 20 лет эксплуатации дока после его ремонта железобетоном необходимо провести дефектацию корпуса с определением остаточных толщин связей, выполнением соответствующих расчетов прочности и принятии решения о возможности дальнейшей эксплуатации дока или выполнения ремонта изношенных связей в случае необходимости.

Расчеты местной прочности выполнены для композитной сталежелезобетонной обшивки днища, и включают расчеты плиты при перегибе и прогибе корпуса, а также расчеты по трещиностойкости для наиболее неблагоприятных состояний нагрузки дока при его эксплуатации. Проверка плиты на раскрытие трещин показала, что герметичность подводной части дока с ЖБУ корпуса обеспечивается.

Вывод: В результате выполненных расчетов общая и местная прочность дока с ЖБУ корпуса обеспечивается.

В результате устройства ЖБУ корпус дока получит утяжеление около 257 т, что приводит к увеличению осадки судна «порожнем» на 0,32 м. Для нормальной работы дока в отсеки средней части корпуса понтона без ЖБУ принимается постоянный сухой (372 т) и укреновочный балласт (8 т). При выполнении ЖБУ количество постоянного сухого балласта уменьшается на величину утяжеления, и количество принимаемого постоянного сухого балласта составит 115 т. При этом осадки и водоизмещение дока при его эксплуатации не изменяются. Величина приема жидкого балласта и последовательность заполнения отсеков дока при его погружении и всплытии сохраняется, как и в проектной документации судна без ЖБУ. Остойчивость дока с ЖБУ улучшается вследствие некоторого понижения центра тяжести корпуса.

Рассчитанные технико-экономические показатели предполагаемого метода ремонта показывают, что при выполнении ЖБУ корпуса дока по сравнению с традиционной заменой изношенных металлоконструкций новыми существенно уменьшается расход металла, трудоемкость и стоимость работ. Ожидаемые трудоемкость и стоимость ремонта корпуса дока проекта Д 600 железобетоном составят около 5,89 тыс. чел. ч. и 2525,0 тыс. руб. соответственно.

JUSTIFICATION OF THE STRUCTURE OF REINFORCED CONCRETE STRENGTHENING THE Д600 METAL DOCK BODY

A.M. Borisov

Under present circumstances a considerable number of carrier ships and bunkering vessels with an operating life of 40-50 years and more need overhaul of the most worn-out underwa-

ter body which can be repaired by conventional techniques on a slipway using ship-lift facilities or in a dock. As a result of continuous service metal docks also need repairs of the underwater body, their reparations involving the utilization of ship-lift facilities or large-sized docks as well. For the purpose of expanding the ship repair park and performing overhaul of the worn-out underwater body without using ship's lifts the Department of Structural Resistance, Hull Design and Ship Structural Mechanics of FSEI HPE VSAWT has created a structure of concrete strengthening the Д600 metal dock body with a lifting capacity of 600 tons afloat with minimum material costs which enables the dock operating life to be extended by 20 more years.

УДК 629.356

С.Н. Гирин, *к.т.н., профессор ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
С.Д. Гордлеев, *аспирант, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ЦИСТЕРНЫ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ЖИДКИХ ГРУЗОВ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

В данной статье рассматриваются результаты расчетов автомобильной цистерны, предназначенной для перевозки жидкого топлива, выполненные с использованием метода конечных элементов на нагрузки, нормируемые ГОСТ. Показано, что выявленные зоны концентрации напряжений хорошо коррелируют с местами появления усталостных трещин в процессе эксплуатации.

В статье [1] авторов, помещенной в настоящем сборнике, показано, что при эксплуатации автомобильных цистерн, предназначенных для перевозки жидкого топлива на отечественных дорогах, возникают трещины во многих элементах корпусной конструкции. Одной из причин возникновения трещин является повышенный уровень напряжений в районах конструктивных концентраторов напряжений. Цистерна обладает достаточно сложной конструкцией, поэтому ее расчет с учетом всех особенностей конструкции возможен только с использованием метода конечных элементов. Для выполнения такого расчета авторами выбран отечественный программный комплекс «ИСПА», который неоднократно использовался авторами ранее. Геометрическая модель построена с помощью программного комплекса «Autodesk inventor» по чертежам, предоставленным ООО «Машиностроительный инжиниринговый центр».

Расчет выполнялся на нагрузки, регламентированные ГОСТ 50913-96). При этом рассмотрены следующие случаи:

1. Равномерный надув изнутри давлением равным удвоенному статическому давлению налитой в цистерну воды.
2. Расчет на ускорение, равное 2g (g – ускорение свободного падения) в направлении противоположном движению цистерны (при торможении).
3. Расчет на ускорение, равное 2g в направлении сверху вниз.
4. Расчет на ускорение, равное 1g в направлении снизу вверх.
5. Расчет на ускорение, равное 1g в направлении перпендикулярном направлению движению.

При разработке конечно-элементной модели конструкции авторы старались учесть все особенности конструкции. Одной из особенностей конструкции цистерны является то, что имеется значительное число усилений в виде наварных листов. В данной модели такие конструктивные элементы имеют совместные узлы по сварным

швам. Остальные узлы могут перемещаться независимо. Очевидно, что принятый подход к разработке расчетной модели дает ошибку в безопасную сторону, поскольку на самом деле эти конструктивные элементы могут при некоторых видах нагрузки контактировать друг с другом по всей поверхности. В «ИСПА» возможно решение контактной задачи, однако оно сложно реализуется и в данном случае практически невозможно. Второй особенностью являются фланцевые сварные соединения переборок и диафрагм с обечайкой цистерны. Фланцевые соединения конструктивных элементов цистерны учтены в расчетной модели достаточно точно.

На рис. 1 показан общий вид конечно-элементной схемы конструкции, а на рис. 2 – схема конструктивных элементов внутри цистерны. Красным цветом на схеме показаны стержневые элементы ящика, расположенного под цистерной, а также схематично показаны запасные колеса в ящике, создающие соответствующую весовую нагрузку.

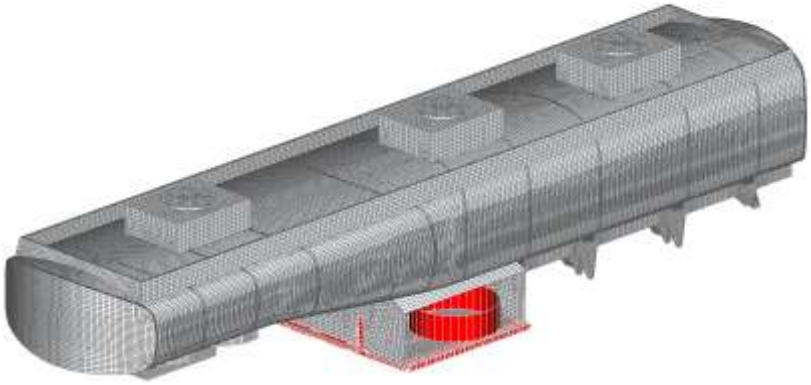


Рис. 1

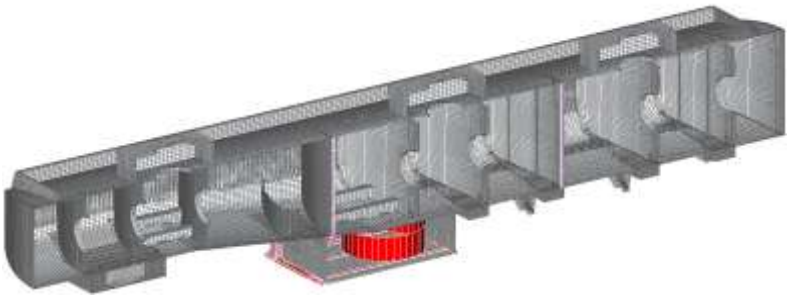


Рис. 2

На рис. 3 и 4 показаны поля напряжений при первом случае нагружения. Красным цветом показаны зоны, в которых эквивалентное напряжение превышает 250 МПа. Следует обратить внимание, что в эти зоны попали участки обечайки вблизи углов заливных горловин, где, как показано в [1], образуются трещины. В соответствии с рис. 3 расчетное значение напряжения в этих участках достигает 580 МПа. Поскольку расчет выполняется в линейной постановке, эти значения завышены, однако они превышают предел текучести материала, следовательно, здесь возможно появление трещин малоцикловой усталости.

На рис. 5 и 6 показаны поля напряжений для второго случая нагружения. Из рисунков следует, что при резком торможении с ускорением 2g возникают значительные напряжения по линиям притыкания поперечных переборок к обечайке цистерны. Расчетные значения напряжений в этом случае также превышают предел текучести

материала. Трещины, показанные на фото 2 статьи [1], соответствуют линиям притыкания переборки, которые выделены красным цветом на рис. 5.

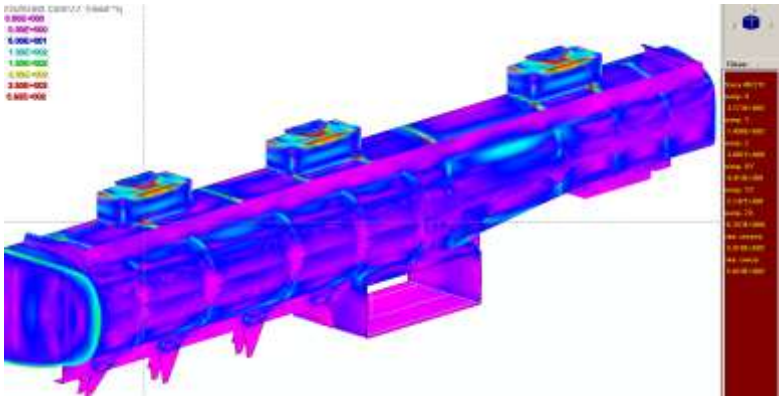


Рис. 3

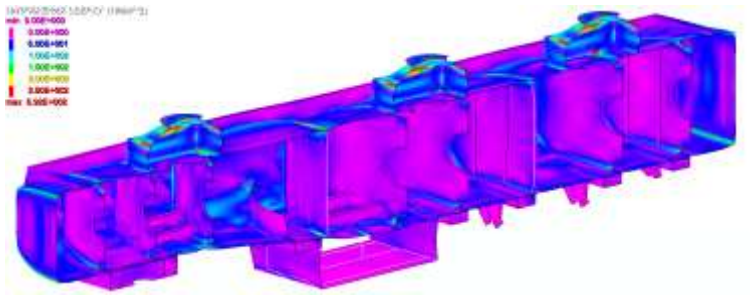


Рис. 4

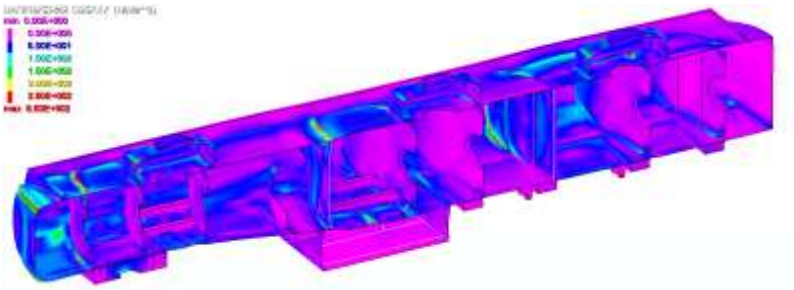


Рис. 5

Для третьего и четвертого случаев нагружения, характерных при движении цистерны по неровной поверхности дороги, поля напряжений показаны соответственно на рис. 7 и 8. Как следует из этих рисунков, общий уровень напряженного состояния в конструкции цистерны несколько ниже рассмотренных выше случаев нагружения. Однако и в этих случаях имеются зоны, в которых напряжения несколько превышают предел текучести материала. Так на рис. 7 видно, что в зоне окончания подкрепляющей жесткости, установленной внутри цистерны над балкой, к которой крепится короб, эквивалентное напряжение достигает 277 МПа. Характерно, что и во всех рассмотренных выше случаях нагружения в этой зоне напряжения превышают предел текучести. На рис. 8 перекрестьем пунктирных линий показана зона в районе горловины, в которой эквивалентные напряжения достигают 347 МПа. Таким образом, при всех рассмотренных случаях нагружения район обечайки вокруг горловин характери-

зуется чрезмерно повышенным уровнем напряжений. Это подтверждается опытом эксплуатации цистерн, показывающим, что здесь появляются трещины при сравнительно небольшой продолжительности эксплуатации.

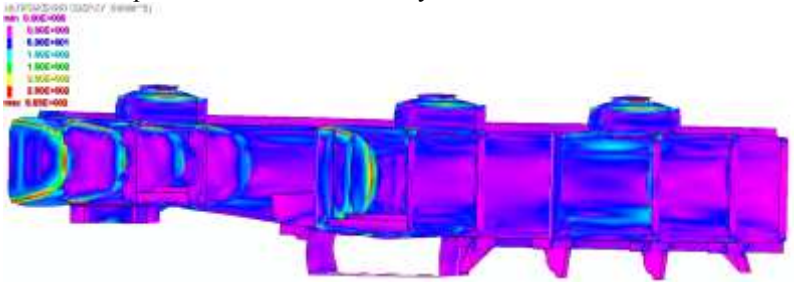


Рис. 6

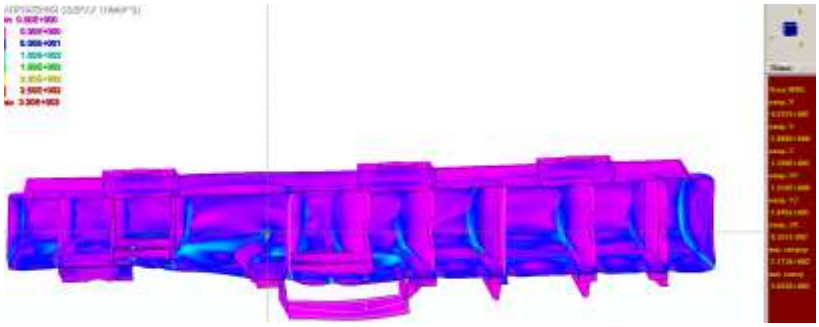


Рис. 7

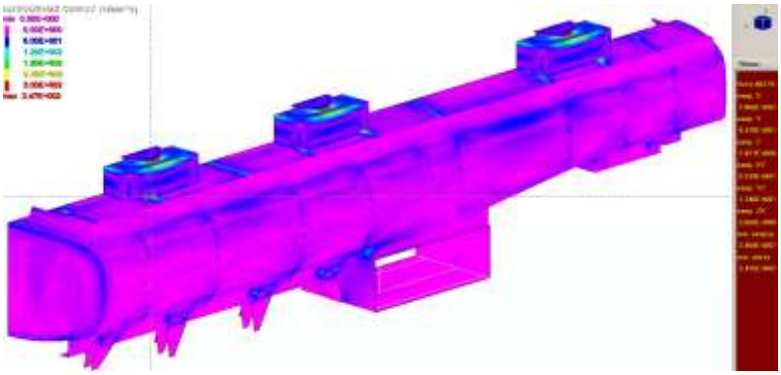


Рис. 8

На рис. 9 показана зона концентрации напряжений в районе окончания грузового ящика, в которой эквивалентное напряжение достигает 179 МПа. Это напряжение меньше предела текучести, однако, достаточно для появления трещин усталости. В статье [1] отмечалось, что здесь имеется нагромождение накладных полос, которые не в полной мере учтены в данной расчетной схеме, поэтому следует ожидать, что реальный коэффициент концентрации напряжений здесь может быть выше. Следует подчеркнуть, что 3 и 4 случаи нагружения характеризуются высокой повторяемостью при эксплуатации цистерны.

На рис. 10 показаны поля напряжений для пятого случая нагружения, который реализуется при поворотах цистерны на высоких скоростях и, в принципе, также достаточно часто встречается. Видны те же зоны концентраторов, что имели место при рассмотренных выше нагружениях.

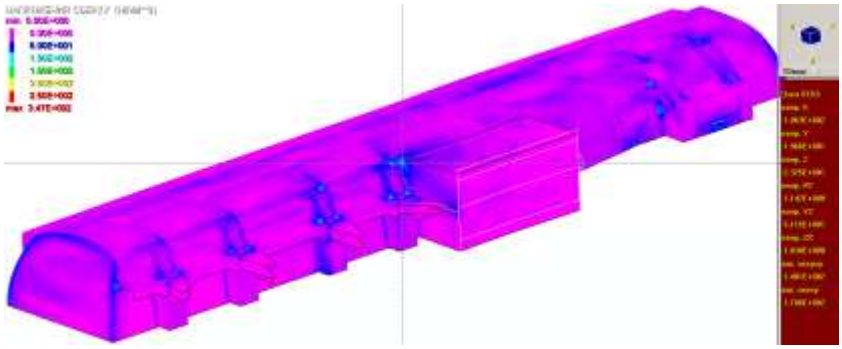


Рис. 9

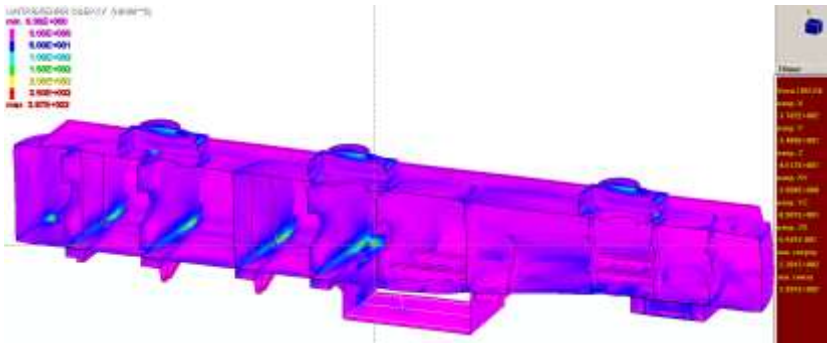


Рис. 10

Завершая анализ полученных в ходе выполненных расчетов результатов, следует отметить, что выявленные зоны повышенных уровней напряжений соответствуют участкам, на которых возникают трещины в процессе эксплуатации [1]. Вместе с тем, расчеты выполнены на квазистатические нагрузки, нормируемые ГОСТ. По-видимому, ГОСТ определяет верхние пределы нагрузок, возможных в эксплуатации, однако в нем ничего не говорится об изменчивости этих нагрузок, поэтому эти нагрузки нельзя использовать для проведения расчетов на усталостную долговечность конструкции. Для этого необходимо выполнение натурных испытаний.

Список литературы

[1] Гирин С.Н., Гордлеев С.Д. Проблемы эксплуатационной прочности автомобильных цистерн для перевозки жидких грузов. Статья в настоящем сборнике.

STRESSED STATE ANALYSIS OF THE MOTOR-CAR TANK FOR LIQUID CARGO TRANSPORTATION UNDER QUASI-STATIC LOADING

S.N. Girin, S.D. Gordleyev

This article deals with the calculation results of a motor-car tank designed for liquid cargo transportation that were performed using a finite-element method with stresses standardized by GOST. It was demonstrated that the stress concentration zones detected correlate closely to the areas of fatigue crack initiation when the tank is in operation.

УДК 629.356

С.Н. Гирин, *к.т.н., профессор ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
С.Д. Гордлеев, *аспирант, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ЦИСТЕРНЫ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ЖИДКИХ ГРУЗОВ

В ходе натурных испытаний цистерны выполнены непрерывные записи ускорений и напряжений в нескольких точках. В статье излагаются основные результаты обработки полученных записей.

В статьях [1] и [2] авторов, помещенных в настоящем сборнике, анализируются причины возникновения трещин в элементах корпусных конструкций автомобильной цистерны при ее эксплуатации в отечественных условиях. В статье [2] по результатам расчетов цистерны, выполненных методом конечных элементов, на нагрузки, регламентированные ГОСТ 50913-96, показано, что зоны повышенных напряжений совпадают с местами возникновения трещин, отмеченными в статье [1]. Вместе с тем очевидно, что трещины носят усталостный характер, поэтому для расчета усталостной долговечности необходимо знать характер изменчивости напряженного состояния. Для этого требуется выполнение натурных испытаний конструкции в условиях, приближенных к реальным.

Для испытаний фирмой ООО «Машиностроительный инжиниринговый центр» была предоставлена новая цистерна, при этом поставлено условие не нарушать лакокрасочное покрытие при установке датчиков. В связи с этим все тензодатчики были установлены внутри цистерны. Схема размещения тензодатчиков и датчиков ускорений показана на рис. 1. Датчики ускорений изображены в виде прямоугольников, а тензодатчики – в виде кружков, стрелками показано направление измерения.

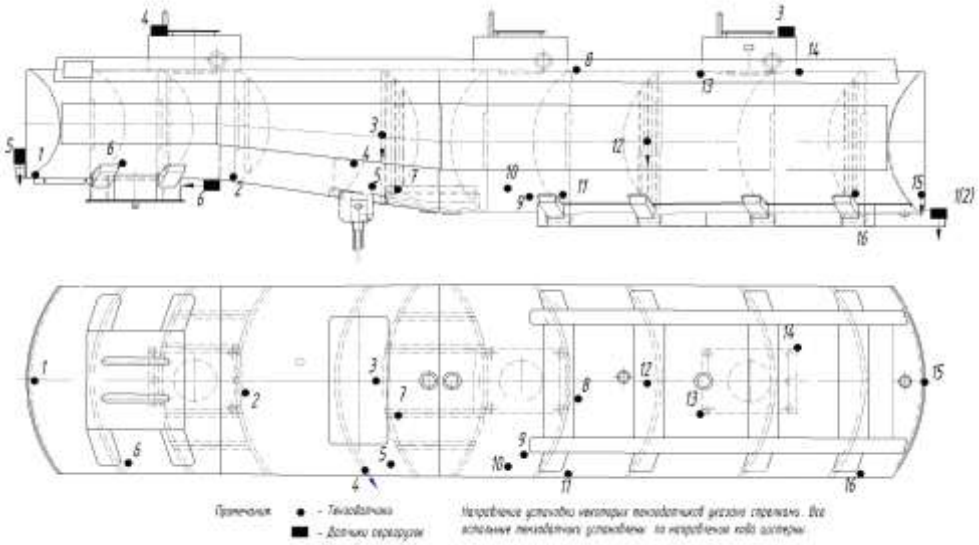


Рис. 1

Для проведения испытаний была разработана программа, по которой испытания разделялись на два вида трассы и три вида нагрузки.

Участки дорог:

1 – асфальтовая дорога третьей категории с подъемами, горками и поворотами;

2 – асфальтовая дорога с кочками.

Виды нагрузки:

1 – в снаряженном состоянии;

2 – заполненные водой первый и третий отсеки (нумерация от головы состава);

3 – заполнены все отсеки.

С учетом скоростных характеристик тягача были выбраны пять расчетных скоростей: 30, 40, 50, 60, 70км/ч. На участке без кочек в определенный момент (из соображения безопасности движения) производилось экстренное торможение.

В процессе испытаний осуществлялась запись в память компьютера напряжений в элементах конструкции цистерны, а также ускорений. Запись напряжений осуществлялась с частотой дискретизации 200 Гц, запись ускорений по датчикам 5 и 6 – с частотой 100 Гц, а по остальным датчикам – с частотой 45 Гц. Записи по всем датчикам осуществлялись одновременно и непрерывно на протяжении каждого опыта.

На рис. 2 показан пример записи по датчикам ускорений при движении цистерны порожнем со скоростью 60 км/час. Одна единица по оси ординат соответствует 0,001g, где g – ускорение свободного падения. На рис. 2 видно, что в определенный момент времени все датчики, измеряющие ускорение в вертикальном направлении, зафиксировали кратковременный всплеск, свидетельствующий о том, что цистерна встретила при движении какое-то препятствие, по-видимому, неровность на дороге, при этом водитель заранее тормозил.

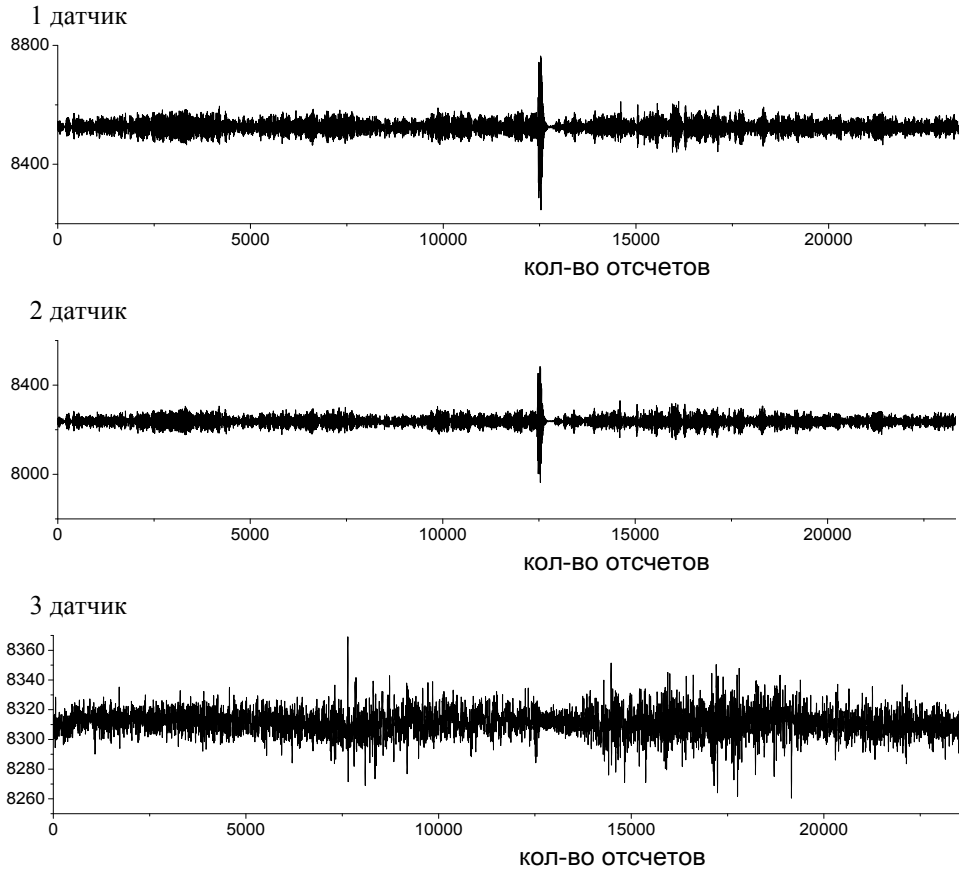
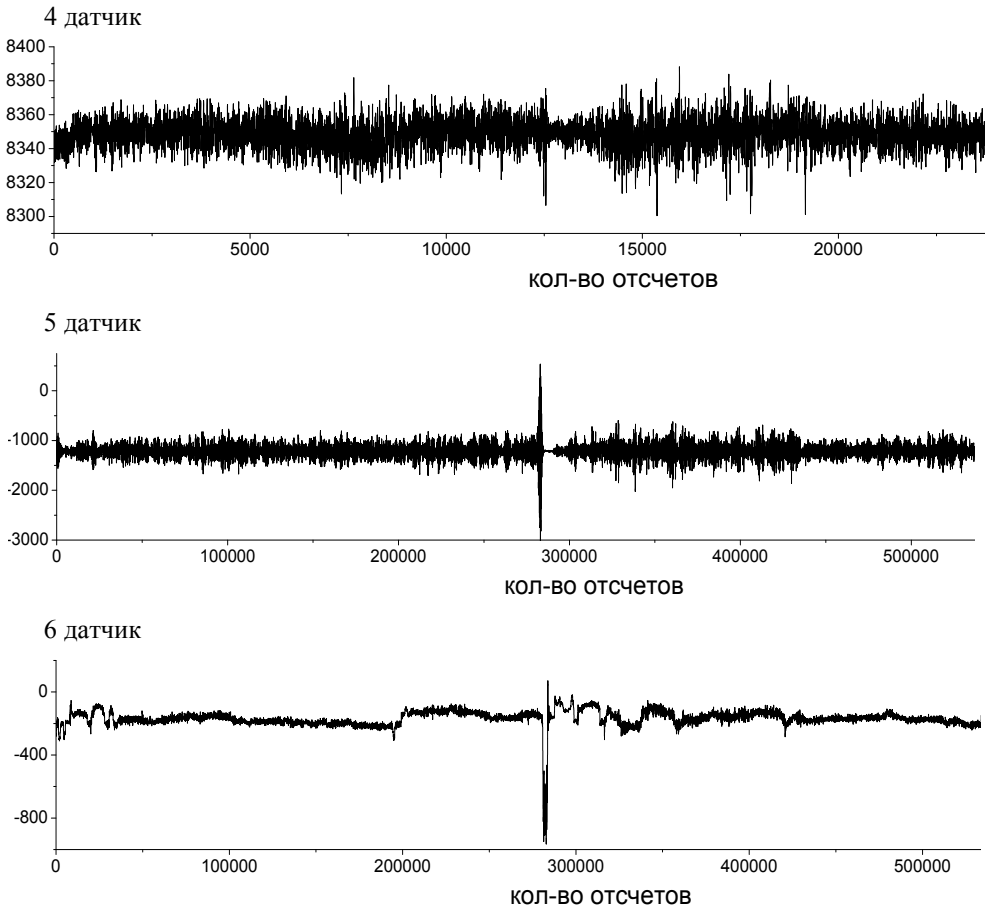


Рис 2



Продолжение рис. 2

Датчиком №5 зафиксировано ускорение в вертикальной плоскости около 1,8g, а датчиком №6 торможение с ускорением около 0,8g. Представленная запись дает максимальные значения ускорений в вертикальной плоскости и в горизонтальной плоскости в направлении движения. При движении с полной загрузкой зафиксированы меньшие значения ускорений. Ускорение в вертикальной плоскости практически равно значению, нормируемому ГОСТ, а в горизонтальной плоскости практически в два раза меньше, чем предписывается ГОСТ. Очевидно, ГОСТ дает значение ускорения при максимально возможном экстренном торможении на покрытии с максимальным коэффициентом трения. Испытания проходили в ноябре 2011 г при морозе до 15 градусов на достаточно скользкой трассе, поэтому резкое торможение было опасно.

Выше было сказано о том, что для оценки долговечности конструкции представляет интерес характер изменчивости внешних усилий и напряжений в конструкции. Записи ускорений позволяют построить их спектры. На рис. 3 представлен спектр записи вертикальных ускорений по датчику №5 при движении порожнем со скоростью 30 км/час, на рис.4 – при движении с заполненными отсеками №1 и №3 на скорости 30 км/час, а на рис. 5 – при движении с полной нагрузкой со скоростью 70 км/час. Из этих рисунков следует, что независимо от характера загрузки цистерны и ее скорости спектр является достаточно узкополосным с максимумом в районе 4 Гц. В связи с этим можно считать, что использованная в эксперименте аппаратура обладает достаточной частотой дискретизации для регистрации ускорений.

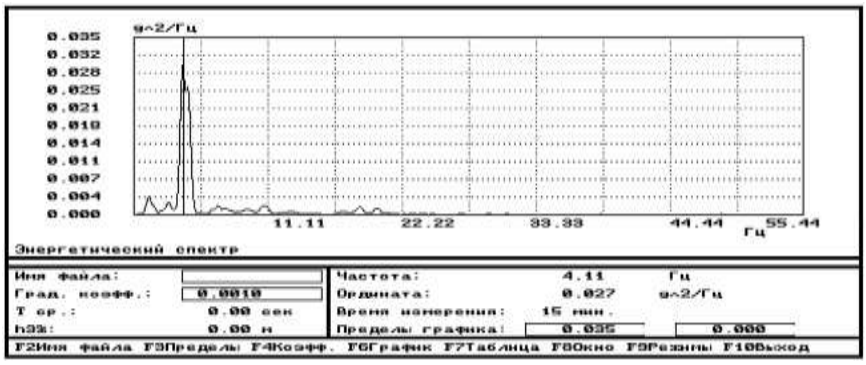


Рис. 3

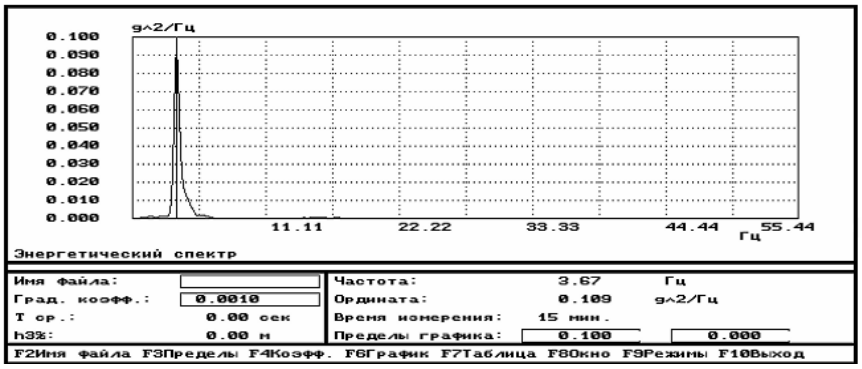


Рис. 4

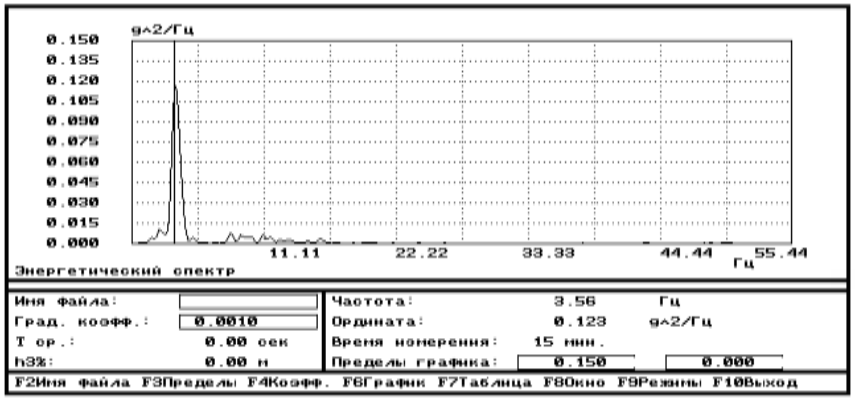


Рис. 5

Выполненные записи напряжений с использованием тензодатчиков позволили определить максимальные значения напряжений в точках, показанных на схеме расстановки датчиков рис. 1. Максимальное значение напряжения 102 МПа зафиксировано тензодатчиком №7. Анализ записей показал, что в процессе движения цистерны изменчивость напряжений не очень велика. Наибольшие размахи колебаний напряжения зафиксированы датчиком №4. На рис. 6 показан фрагмент записи напряжений по датчику №4, при этом мат. ожидание смещено в ноль. На рис. 7 показан спектр отфильтрованной записи, из которой удалены частоты выше 10 Гц. Анализ показал, что на частотах выше 10 Гц наблюдается только шум прибора регистрации напряжений с амплитудой порядка 1,5–2,0 МПа.

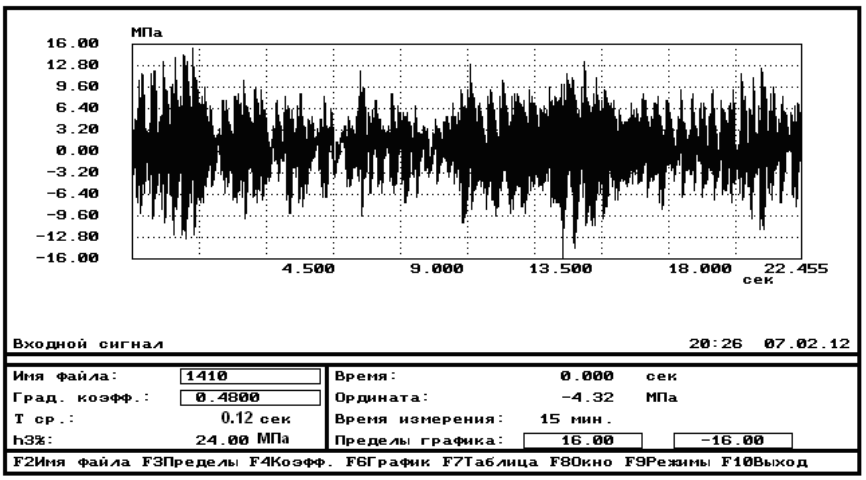


Рис. 6

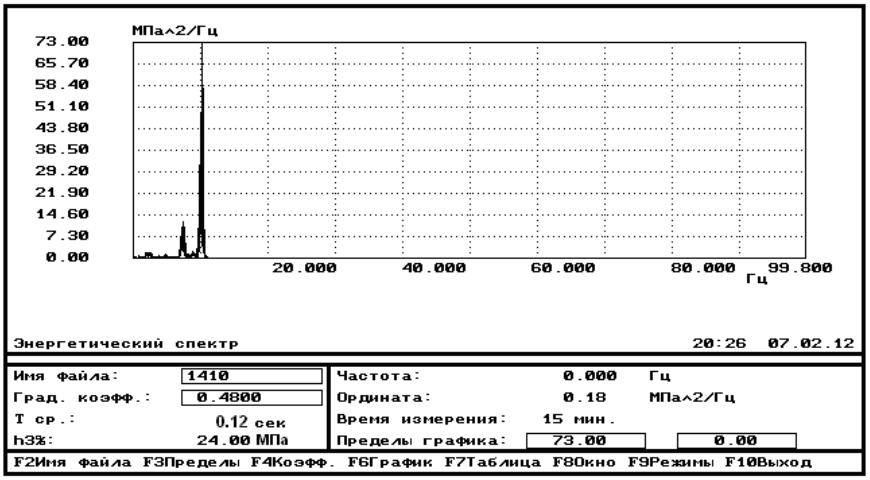


Рис. 7

Полученные в процессе натурных испытаний цистерны результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Зафиксированная величина вертикальных ускорений практически совпадает с нормативным значением ГОСТ, остальные ускорения меньше нормативных значений.

2. Спектры частот ускорений и напряжений в конструкции располагаются в диапазоне 0–10 Гц.

Используя полученные результаты, можно выполнить динамический расчет прочности конструкции цистерны для определения более подробной картины изменчивости напряжений и дальнейшей оценки усталостной долговечности.

Список литературы

[1] Гирин С.Н., Гордлеев С.Д. Проблемы эксплуатационной прочности автомобильных цистерн для перевозки жидких грузов. Статья в настоящем сборнике.

[2] Гирин С.Н., Гордлеев С.Д. Анализ напряженного состояния автомобильной цистерны для перевозки жидких грузов при квазистатических нагружениях. Статья в настоящем сборнике.

FULL-SCALE TESTING OF THE MOTOR-CAR TANK FOR LIQUID CARGO TRANSPORTATION

S.N. Girin, S.D. Gordleyev

In the course of full-scale tank tests continuous data recording of accelerations and stresses at a number of points was performed. The article presents major record processing results.

УДК 629.356

С.Н. Гирин, *к.т.н., профессор ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
С.Д. Гордлеев, *аспирант, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ЦИСТЕРН ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ЖИДКИХ ГРУЗОВ

В данной статье на основе фотоматериалов, предоставленных авторам специалистами ООО «Машиностроительный инжиниринговый центр», анализируются причины возникновения трещин в элементах корпусной конструкции одной из автомобильных цистерн, предназначенной для перевозки жидкого топлива и намечаются пути решения проблемы увеличения эксплуатационной прочности на этапе проектирования цистерны.

В настоящее время значительный объем нефтепродуктов перевозится в автомобильных цистернах, причем имеет место тенденция по увеличению объема таких перевозок в связи с возрастанием количества автозаправочных станций. На отечественный рынок поставляются цистерны, изготовленные за рубежом, а также отечественными производителями. В связи с появлением достаточно мощных тягачей производители цистерн стремятся к увеличению их грузовместимости. Общий вид цистерны с тягачом показан на рис. 1.

Рис. 1

Проектирование цистерн осуществляется с учетом планового срока ее эксплуатации, после которого цистерна утилизируется. В связи с этим проектировщики для

уменьшения себестоимости изготовления стремятся к минимизации толщин корпусных конструкций цистерны и упрощению технологии изготовления.

Очевидно, что тенденция к уменьшению строительных толщин находится в противоречии с надежностью эксплуатации конструкции. Учитывая состояние отечественных дорог, можно предположить, что конструкция цистерны испытывает весьма значительные динамические нагрузки, которые могут явиться причиной возникновения трещин.

Опыт эксплуатации цистерн в нашей стране показал, что такие трещины имеют место. Особенно опасны трещины, сопряженные с разгерметизацией топливных отсеков и протеканием топлива. В этом случае возможно возгорание цистерны, что и происходит на практике. Обследование одной из цистерн показало наличие в ее конструкции многочисленных трещин, часть из которых приводит к протеканию топлива. На рис. 2 и 3 показаны примеры таких трещин.

На рис. 2 трещины возникли по стыковому шву оболочки цистерны, а на фото 3 в элементе рамы, крепящей цистерну к платформе тягача. В первом случае разгерметизация происходит сразу после образования трещины в сварном шве, однако такую трещину сравнительно легко устранить. Для этого можно разделать шов и снова его заварить. Во втором трещина возникает в точке пересечения сварных швов в сравнительно толстых накладках. Такие трещины развиваются постепенно и могут перейти на обечайку цистерны. В этом случае ликвидировать протекание топлива чрезвычайно сложно, подварка трещины практически ничего не даст, поскольку сама является дополнительным источником концентрации напряжений.

Рис. 2

Рис. 3

Рассматривая зафиксированные на фотографиях трещины, можно выделить несколько причин их появления.

Во-первых, это технологические проблемы. По-видимому, трещины, показанные на фото 2, связаны с некачественной сваркой: наличие микродефектов в сварном шве и полей остаточных сварочных напряжений, которые возникают при нарушении технологии и неправильно разработанной технологии сварочных работ.

Во-вторых, неправильное конструирование узлов. Так, на рис. 4 показаны классические для судостроения примеры конструкций с так называемой «жесткой точкой». Очевидно, что в районе этих точек неизбежно возникновение трещин малоцикловой усталости, бороться с которыми заваркой бесполезно. Это видно по нагромождению дополнительных сварных швов на рис. 4. Примером неправильного конструирования является «слоеный пирог» из листов различной толщины, показанный фото 3. Расположенные рядом сварные швы и их пересечение вызывают поля значительных сварочных напряжений, которые в условиях динамических нагружений приводят к появлению трещин. Оценить расчетом такие конструкции практически невозможно, поэтому при проектировании следует избегать таких конструкций. В соответствии с практикой проектирования судовых конструкций целесообразно вместо накладных листов использовать стыковые соединения утолщенных листов.

Рис. 4

Рис. 5

В-третьих, наличие конструктивных концентраторов напряжений. На рис. 5 показана трещина, образовавшаяся в обечайке цистерны в углу заливной горловины. На фото видно, что трещина носит сквозной характер, поэтому чрезвычайно опасна в пожарном отношении. Видно также, что неоднократные попытки заварить трещину ни дали положительного результата. Устранение таких трещин возможно только путем удаления дефектного участка и вварки нового листа. Такие концентраторы, в принципе поддаются расчету, т.е. путем расчета можно выявить зону концентрации и принять конструктивные меры по снижению уровня концентрации напряжений.

Следует отметить, что в конструктивном отношении цистерна весьма сложна. Внутри нее располагаются поперечные переборки и диафрагмы, часть из которых подкреплена ребрами, при этом оформление узлов пересечения ребер с тонкостенной обшивкой обечайки цистерны и ее переборок не соответствует практике судостроительных и авиационных конструкций, что также является источником конструктивной концентрации напряжений и возникновения трещин (см. рис. 6).

Рис. 6

Изложенное выше позволяет сделать заключение о том, что имеется проблема с эксплуатационной прочностью рассматриваемых конструкций. Решение проблемы нам видится в комплексном подходе к проектированию, при этом должны быть решены следующие задачи:

1. Необходима тщательная конструкторская проработка отдельных узлов конструкции с учетом опыта проектирования в смежных отраслях промышленности.
2. Требуется анализ технологии изготовления и выполнения сварочных работ. Необходимо также разработать технологические процессы ремонта по устранению возникающих трещин, поскольку необдуманная заварка трещин не приведет к решению проблемы, а может лишь усугубить ее.
3. Для анализа напряженного состояния необходимо выполнение расчетов с применением метода конечных элементов.
4. Желательно выполнение инструментальных замеров ускорений и напряжений в элементах конструкции при движении на характерных участках эксплуатации цистерны.
5. На основе полученной информации по величине полей напряжений и их изменчивости можно выполнить прогноз усталостной долговечности конструкции.

В следующей статье авторов, помещенной в настоящем сборнике, исследуется напряженное состояние конструкции с использованием отечественного программного комплекса «ИСПА», реализующего метод конечных элементов. Расчеты выполнены на нагрузки, регламентируемые ГОСТ.

SERVICE DURABILITY PROBLEMS OF TRUCK TANKS FOR LIQUID CARGO TRANSPORTATION

S.N. Girin, S.D. Gordleyev

Based on the photographic material provided to the authors by experts of Machine-Building Engineering Centre LTD (OOO “Machinostroitelny inginiringovy tsentr”) the present article makes an analysis of reasons for crack initiation in structural elements of a truck tank shell designed for liquid cargo transportation; methods of solving the problem of service durability enhancement at the tank design stage are outlined as well.

УДК 629.12.011.004.69

С.Н. Гирин, *зав. кафедрой, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
В.Б. Протопопов, *вед. инженер, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
С.В. Созинов, *ст. преподаватель, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

ОПЫТ РАБОТЫ КАФЕДРЫ СМ, КК И СМК ФБОУ ВПО «ВГАВТ» ПО РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ СУДОВ

В данной статье приведен экономичный вариант модернизации танкеров проекта 1577 типа «Волгонефть», вызванной необходимостью выполнения указаний МАРПОЛ по предотвращению загрязнению нефтью в случае столкновения или посадки на мель, и описание подкрепления нефтеналивных барж проекта Р27 типа «Бельская», обеспечивающего их эксплуатацию с классом «О1,5». Приведены также экспериментальные данные по остаточным напряжениям в палубе т/х «Волгонефть 255», имеющего деформацию общего перегиба.

В последние годы коллективом кафедры сопротивления материалов, конструкции корпуса и строительной механики корабля (СМ, КК и СМК) выполнен ряд работ по заявкам предприятий и организаций, которые, в целом, носят инженерно-конструкторский характер, однако содержат в себе элементы новизны предлагаемых решений.

Одной из таких работ является модернизация конструкции танкера типа «Волгонефть» путем увеличения высоты двойного дна. Модернизация вызвана необходимостью выполнения указаний МАРПОЛ (Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ 73/78). Книги I и II. – СПб., ЗАО ЦНИИМФ, 2008) по предотвращению загрязнению нефтью в случае столкновения или посадки на мель, приведенных в Правиле 19 Приложения I.

Согласно указаниям МАРПОЛ у нефтяного танкера дедвейтом менее 5000 т высота двойного дна должна быть не менее B/15, где B – ширина судна, что применительно к данному танкеру составляет 1100 мм. Для выполнения этого требования существующая высота двойного дна должна быть увеличена на 300 мм.

В связи со значительным износом второго дна полностью заменяется его настил с холостым набором. Вместе с тем, анализ результатов дефектации показал, что толщины связей междудонного набора удовлетворяют требованиям Правил Речного Регистра. Для упрощения технологии замены кафедрой предложено следующее конструктивное решение. Старое второе дно удаляется, за исключением полосок шириной 100 мм вокруг рамного набора, к которым привариваются вертикальные полосы, с помощью которых достигается необходимая высота стенок рамного набора новой конструкции двойного дна. В зависимости от принятой на заводе технологии новое второе дно может собираться секционно или россыпью. Обновленная конструкция двойного дна показана на рис. 1.

Доказана экономическая целесообразность использования стали РСД 32 для изготовления настила двойного дна вместо стали нормальной прочности, это позволяет существенно уменьшить толщину настила двойного дна.

В соответствии с требованиями МАРПОЛ грузовые танки по всей длине должны быть защищены балластными танками или отсеками, не являющимися нефтяными танками, которые должны быть устроены так, чтобы грузовые танки располагались внутрь от теоретической бортовой обшивки применительно к танкерам рассматриваемого типа на расстоянии не менее 0,957 м. Это требование не выполняется только на незначительном участке вблизи пересечения внутреннего борта, форпиковой переборки и второго дна. С целью исключения изменения положения внутренних бортов,

что предусмотрено другими проектами модернизации, требуемая ширина двойного борта достигается путем установки на ограниченном участке в этом районе дублера внутреннего борта. Доступ внутрь этого «короба» осуществляется из двойного борта через вырезанный лаз. Конструкция «короба» приведена на рис. 2.

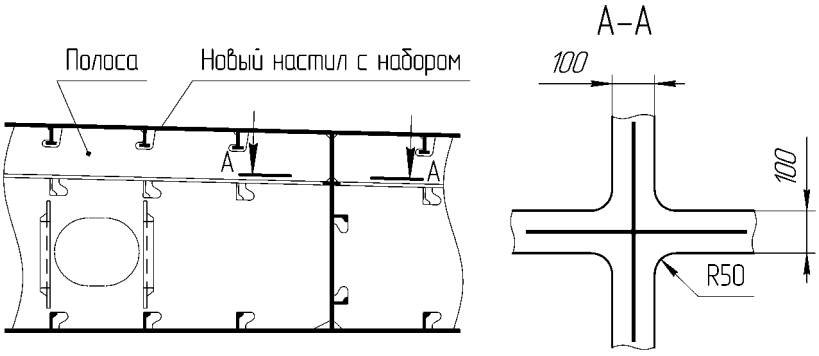


Рис.1

Рис. 2

Предложенные авторами решения были реализованы в ходе ремонтных работ т/х «Волгонефть 105» на Городецкой судоверфи ОАО «Судоремонтно-судостроительная корпорация» в 2011 г.

В ходе дефектации корпуса выявлена значительная остаточная деформация общего перегиба корпуса со стрелкой 285 мм. Было принято решение об устранении такой деформации. Авторами предложена методика выполнения таких работ. Для выпрямления корпуса выполнены два поперечных разреза по длине корпуса. Были разрезаны все продольные связи за исключением настила и продольных ребер палубы. После выполнения работ по спрямлению корпуса общая остаточная деформация корпуса не превысила 80 мм.

Вопрос о причинах возникновения остаточной деформации корпусов судов типа «Волгонефть» и их допустимости остается дискуссионным. Большинство специалистов считает, что причиной является выполнение ремонтных работ корпуса с заменой значительного числа листов палубы на плаву, однако имеется мнение о том, что эти

деформации являются следствием недостаточной прочности корпуса при эксплуатационных перегрузках (попадание на волнение чрезмерной интенсивности). Ответ на этот вопрос могли бы дать замеры полей остаточных напряжений в корпусах судах, но в доступных источниках отсутствуют сведения о выполнении таких замеров.

К сожалению, в ходе выполнения работ по ремонту т/х «Волгонефть 105» осуществить такие замеры не удалось, однако они были выполнены на теплоходе «Волгонефть 255». Стрелка остаточного перегиба на этом судне превышала 400 мм, однако для выпрямления корпуса был выполнен лишь один поперечный разрез, в результате вместо одного большого горба на судне возникло два горба меньших размеров. Речным Регистром было потребовано от исполнителя работ доказательство допустимости такого исправления с точки зрения общей прочности. Для замеров полей остаточных напряжений были приглашены специалисты нашей кафедры.

Для замеров остаточных напряжений на плаву были установлены тензодатчики в трех поперечных сечениях, одно из которых находилось вблизи сечения реза корпуса, а два остальных – на достаточном удалении от него. Несколько датчиков было наклеено на продольных ребрах межбортового пространства в районе 64–67 шп. (точки 1 и 2 в последующих таблицах); несколько датчиков наклеено на настил палубы около карлингса в районе 70 шп. (точка 3); датчики были установлены ра ребрах 103–106 шп. (точки 4 и 5); на ребрах в районе 136–139 шп. (точки 6 и 7). После замера показаний датчиков были вырезаны механическим способом участки связей с наклеенными датчиками и снова замерены показания. Таким образом, получены значения действующих напряжений в связях на плаву для состояния нагрузки корпуса «Порожнем с 10% запасов», приведенные в табл. 1

Таблица 1

Замеренные напряжения в корпусе судна на плаву

Номер точки замера	Номер тензодатчика	Напряжения, МПа	
		В тензодатчике	Среднее
1	4	4,0	6,5
	5	1,6	
	6	13,9	
2	3	16,0	17,0
	4	18,0	
3	3	16,8	13,9
	4	13,6	
	5	11,2	
4	4	16,4	14,4
	5	14,4	
	6	12,4	
5	3	41,3	37,6
	4	40,0	
	5	31,6	
6	3	88,0	87,2
	4	86,4	
7	4	42,8	33,3
	5	27,2	
	6	30,0	

Аналогичные напряжения были получены при нахождении корпуса на стапеле, однако их нельзя использовать для определения остаточных напряжений на плаву, поскольку на стапеле корпус находится в напряженном состоянии из-за его искрив-

ленности. Таким образом, для решения поставленной задачи, необходимо воспользоваться теоретическим решением для напряжения палубных конструкций в состоянии «Порожнем с 10% запасами». Такие расчеты содержатся в работах [1] и [2]. Результаты этих расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер теор. шп.	Номер точки замера	Величина изгибающего момента, МН·м			Напряжение, МПа
		[1]	[2]	Среднее	
5,5	1, 2, 3	37,6	49,2	43,4	35
9	4, 5	82,5	85,9	84,2	68
12,5	6, 7	105,4	94,0	100,0	81

На основании результатов, представленных в табл. 1 и 2, можно получить значения остаточных напряжений в связях палубы, которые показаны в табл. 3. *Из этой табл. следует, что остаточные напряжения невелики, поэтому их можно считать результатом технологических операций по замене листов настила палубы. Однако такой вывод нельзя признать однозначным. Необходимо продолжить подобного рода исследования.*

Таблица 3

Номер теор. шп	Номер точки замера	Напряжение, МПа		
		Эксперимент	Расчет	Остаточное
5,5	1, 2, 3	12	35	-23
9	4, 5	26	68	-42
12,5	6, 7	55	81	-26

Второй цикл работ связан с переклассификацией нефтеналивных барж проекта Р27. Согласно исходному проекту эти баржи предназначались для эксплуатации в бассейнах разряда «Р» с выходом в водохранилища с ограничением по погоде до 5 баллов. Однако с учетом недостатков конструкции корпуса и ужесточения требований, предъявляемых Российским Речным Регистром (РРР) к баржам проекта Р27, на условия эксплуатации барж без двойного дна и двойных бортов наложены дополнительные ограничения. Для эксплуатации в бассейнах разряда «О» они должны быть переклассифицированы, по крайней мере, на класс «О1,5» в соответствии с действующими Правилами РРР с обоснованием достаточности прочности прямым индивидуальным расчетом и необходимым подкреплением днища и палубы.

Анализ результатов дефектации ряда таких барж показал, что настил палубы имеет значительный износ, при этом остаточная толщина не удовлетворяет требованиям Правил Речного Регистра к баржам таких размеров класса «О». Выполнение требований Правил сопряжено с заменой значительного количества листов настила палубы, что резко снижает экономическую целесообразность такого рода модернизации. В связи с этим, кафедрой было предложено конструктивное решение, связанное с установкой дополнительных продольных балок палубы снаружи корпуса между смежными существующими ребрами (см. рис. 3). Показанные на рисунке кницы и полосы необходимы для повышения устойчивости балок и устранению «жестких точек». Следует подчеркнуть, что установка дополнительных балок поверх настила палубы может быть выполнена на плаву, что дает существенную экономию при проведении ремонтных работ.

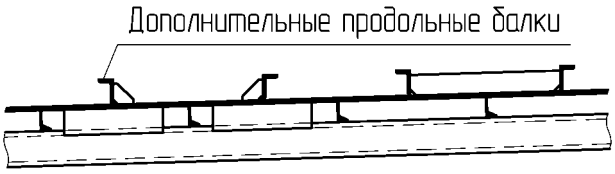


Рис. 3

Такое предложение позволило решить несколько задач.

Во-первых, благодаря уменьшению вдвое размеров продольной шпации в соответствии с требованиями Правил Речного Регистра практически вдвое уменьшаются нормативы остаточных толщин листов палубы, что исключает необходимость дорогостоящей замены листов.

Во-вторых, уменьшение шпации приводит к увеличению эффективности работы палубы при обеспечении общей продольной прочности за счет увеличения редукционных коэффициентов пластин.

Следует отметить, что баржи этого проекта обладают чрезмерной гибкостью и склонны к резонансным колебаниям на волнении. В соответствии с Правилами Речного Регистра расчетный дополнительный волновой изгибающий момент у них достигает значительной величины. Существенного снижения расчетного изгибающего момента можно добиться небольшим увеличением жесткости корпуса. Предложенное решение позволяет увеличить жесткость корпуса и снизить расчетный момент, что в совокупности с увеличением момента сопротивления приводит к значительному увеличению общей продольной прочности.

В проект баржи заложена неудачная с точки зрения общей прочности конструкция, при которой холостые продольные балки обрываются при подходе к поперечным переборкам. Исследованием напряженного состояния обрываемых на переборках продольных балок, проведенным на кафедре, установлено, что их площадь должна вводиться в ЭБ с редукционным коэффициентом $\varphi = 0{,}5$, что резко снижает эффективность участия продольных ребер в обеспечении общей прочности. Предложено усиление этого узла, обеспечивающее непрерывность продольного набора.

Предложенное кафедрой решение реализовано при ремонте 12 барж и принесло судовладельцам ощутимый экономический эффект. Следует ожидать, что перечень выполненных в процессе ремонта мероприятий существенно повысит эксплуатационную надежность барж, поскольку до этого наблюдались достаточно частые случаи перелома барж в процессе грузовых операций из-за недостаточной общей прочности.

Несколько барж этого проекта были подкреплены ранее железобетоном по проекту, разработанному кафедрой. Опыт эксплуатации таких барж подтвердил их высокую надежность, а проект переклассификации их на класс «О 1,5» не потребовал выполнения дополнительных подкреплений корпуса.

Опыт выполнения подобного рода работ показал, что кроме коммерческого интереса для коллектива кафедры они имеют весьма важную сторону повышения квалификации сотрудников кафедры в области инженерной деятельности, опыта которой недостает особенно у молодых сотрудников. Кроме того, выполнение таких работ приводит к укреплению связей ВУЗа с предприятиями и организациями отрасли.

Список литературы

[1] Т/х «Волгонефть-255». Расчет фактической прочности корпуса. Выпуск МИБ.4121. 2011, 323 л. (рукопись).

WORK EXPERIENCE OF THE DEPARTMENT OF STRUCTURAL RESISTANCE, HULL DESIGN AND SHIP STRUCTURAL MECHANICS OF FSEI HPE VSAWT IN THE SHIP MODERNIZATION DESIGN DEVELOPMENT

S.N. Girin, V.B. Protopopov, S.V. Sozinov

This paper presents an economical option of modernization of the "Volgoneft" type 1577 tanker caused by the necessity for carrying out MARPOL guidelines on the prevention of oil spills in the event of collision or grounding. The paper also gives a description of stiffening of the "Belskaya" type P27 fuel barge which provides its operation with class "O1,5". Experimental data are also given on residual deck stress of M/V "Volgoneft 255" having a general hogging strain.

УДК 629.12:539.4

С.Н. Гирин, *к.т.н., профессор ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
А.М.Фролов, *к.т.н., доцент, ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

О ВЛИЯНИИ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗА ВОЛНЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ВОЛНОВЫХ ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ СУДОВ СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ С КЛАССОМ РОССИЙСКОГО РЕЧНОГО РЕГИСТРА

В статье на основании литературных источников показано, что в настоящее время прогнозы волнения в бассейнах эксплуатации судов смешанного плавания могут быть с ошибкой в опасную сторону. Предложена корректировка полученных ранее авторами зависимостей для волновых изгибающих моментов таких судов с учетом ошибки прогнозов волнения.

Суда смешанного плавания (ССП) эксплуатируются в море с ограничениями по волнению. Допускаемая прогнозная высота волны для судов класса «М-СП», в соответствии с действующими Правилами [1] Российского Речного Регистра (РРР), составляет $[h_{3\%}^{пр}] = 3{,}5\ м$. При введении дополнительных ограничений допускаемая прогнозная высота волны для судов класса «М-СП» может быть снижена до $[h_{3\%}^{пр}] = 3{,}0\ м$ Для судов класса «М-ПР» допускаемая прогнозная высота волны составляет $[h_{3\%}^{пр}] = 2{,}5\ м$. А при введении дополнительных ограничений $[h_{3\%}^{пр}] = 2{,}0\ м$. Для судов класса «О-ПР» допускаемая прогнозная высота волны составляет $[h_{3\%}^{пр}] = 2{,}0\ м$, а при введении дополнительных ограничений – $[h_{3\%}^{пр}] = 1{,}5\ м$.

Существенное значение для безопасности судов смешанного плавания, не имеющих излишних запасов прочности, имеют достоверность и оправдываемость прогнозов волнения.

Как следует из работы [3], к настоящему времени ещё не выработан единый подход к оценке влияния возможных ошибок прогноза на расчётные параметры волнения, используемые при оценке прочности судов. Это, прежде всего, связано со значи-

тельной сложностью задачи и отсутствием достаточного количества исследований по данной проблеме.

Прогноз волнения в настоящее время составляется на основании сложных компьютерных расчётов. Достоверность расчётного определения параметров ветрового волнения зависит от качества физической модели, точности задания полей ветра, от метода численной реализации задачи. Источником ошибок может явиться также недостаточно точный учёт влияния волн зыби, которые, складываясь с ветровыми волнами, образуют смешанное волнение.

Суда смешанного плавания эксплуатируются на прибрежных морских трассах, где на процесс волнообразования и параметры волн влияют очертания и рельеф берегов, направление действия ветра, малые глубины, наличие и расположение островов и др. Физическая модель и поля ветра в данном случае являются существенно более сложными, чем для открытых морей и океанов. Разумеется, что в данном случае достоверность прогноза волнения снижается.

Для развития интенсивного волнения в открытых морях требуется длительное воздействие стабильно дующего ветра. А волнение малой интенсивности, характерное для судов смешанного плавания, развивается достаточно быстро даже при воздействии неустойчивого ветра [13].

В работе [8] показано, что при стабильно дующем ветре время t_1,час, необходимое для развития волнения интенсивностью $h_{3\%}$, м, на открытых глубоководных акваториях, может быть вычислено по формуле

$$t_1 = 8{,}07 \cdot 10^3 \cdot h_{3\%}^{2{,}38} \cdot w^{-3{,}76} \qquad (1)$$

где w – скорость ветра, *м/с*

В соответствии с исследованиями, выполненными О.З. Степановым и Ю.И. Ефименковым, расчётная скорость ветра w не должна приниматься меньше 14,8 м/с для класса «М-СП», 14,0 м/с для класса «М-ПР» и 13,0 м/с для класса «О-ПР». Зависимость времени t_1 от высоты волны $h_{3\%}$ при указанных скоростях ветра w, показана на рис.1. и в табл.1, из которых следует, что для судов смешанного плавания время развития допускаемого волнения $[h_{3\%}]$ составляет всего около $3 \div 6$ часов, а при введении дополнительных ограничений по волнению оно уменьшается примерно в 2 раза. Это обстоятельство также снижает достоверность прогноза.

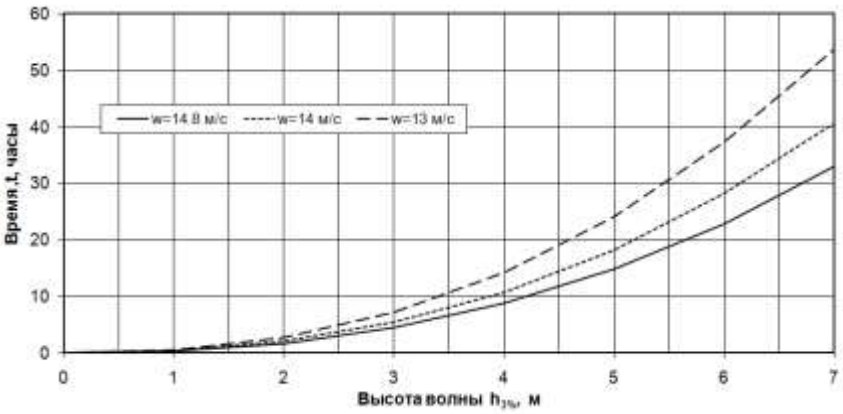


Рис. 1. Время t_1, час, необходимое для развития волнения интенсивностью $h_{3\%}$, м

Таблица 1

Время t_1, *час*, необходимое для развития волнения высотой $h_{3\%}$, м, при стабильном ветре, дующем со скоростью w, *м/с*.

Высота волны $h_{3\%}$, *м*		1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6
t_1, *час*	$w = 14{,}8\,м/с$	0,3	0,8	1,7	2.8	4,4	6,3	8,7	14,8	22,8
	$w = 14{,}0\,м/с$	0,4	1.1	2,1	3,5	5,4	7,8	10,7	18,2	28,1
	$w = 13{,}0\,м/с$	0,5	1,4	2,7	4,6	7,1	10,4	14,2	24,1	37,8

Оправдываемость прогноза волнения зависит от его заблаговременности (глубины). Известно, что оправдываемость прогноза снижается с увеличением глубины прогноза. Для примера, в табл. 2 приведены некоторые сведения по оправдываемости прогноза средних высот волн в Северной Атлантике, заимствованные из работы [11]. Из неё следует, что при числе измерений 231÷259 оправдываемость с увеличением глубины прогноза с 12 до 72 часов снижается с 80% до 70%.

Таблица 2

Оправдываемость Q (%) прогноза средних высот волн

Заблаговременность (глубина) прогноза (в часах)	12	24	36	48	60	72
Число измерений, N	245	259	231	237	237	246
Оправдываемость прогноза, Q (%)	80	79	77	72	72	70

В результате сопоставления прогнозируемых, $h_{cp}^{пр}$, и фактических, h_{cp}, средних высот волн в Северной Атлантике, выполненного в Гидрометцентре России [2], выявилась систематическая ошибка превышения фактической высоты волны по отношению к прогнозируемой высоте (табл. 3). Эти превышения связаны с недоучетом составляющей ветровой зыби, возникающей при ослаблении скорости ветра в шторме или зыби, пришедшей в расчетную точку от удаленных штормов, а также с ошибками в расчетах прогностических полей давления и полей ветра.

К настоящему времени в России разработана единая Государственная система информации об обстановке в мировом океане ЕСИМО [13], в соответствии с которой прогнозируются:

– скорость ветра w, м/с;

– высота значительных (преобладающих) ветровых волн $h_{1/3} = h_{13{,}5\%}$, м и направление их распространения;

– средний период ветровых волн τ_{cp}, с;

– высота значительных (преобладающих) волн зыби, $h_{1/3} = h_{13{,}5\%}$, м, и направление их распространения,

– средний период волн зыби τ_{cp}, с.

Таблица 3

Сопоставление прогнозируемых, $h_{cp}^{пр}$, и фактических, h_{cp}, средних высот волн в Северной Атлантике

№ опыта	Прогнозируемая средняя высота волны, $h_{cp}^{пр}$, м	Фактическая средняя высота волны, h_{cp}, м	Абсолютная ошибка $\Delta = h_{cp} - h_{cp}^{пр}$, м	Средняя относительная ошибка, %
1	2,3	2,7	0,4	22
2	2,8	3,2	0,4	15
3	1,9	2,2	0,3	27
4	2,2	2,4	0,2	24
5	1,6	1,9	0,3	31
6	1,4	1,6	0,2	26
7	2,0	2,3	0,3	16
8	2,1	2,3	0,2	11
9	3,1	3,2	0,1	16
10	3,0	3,1	0,1	14
11	1,7	1,9	0,2	20
12	1,9	2,1	0,2	14
13	1,8	2,1	0,3	16

Прогнозируемые параметры размещаются на электронных картах (рис. 2) Направления ветра и волнения на картах изображаются в виде векторов. Поля высот волн $h_{1/3}$ (в зависимости от бурности моря) показываются с точностью 0,25 м или 0,5 м. Средняя длина волн отображается с точностью 5 м или 6 м. Средний период волн τ_{cp} показывается с точностью 0,5 с или 0,6 с. Прогностическими электронными картами можно пользоваться через интернет.

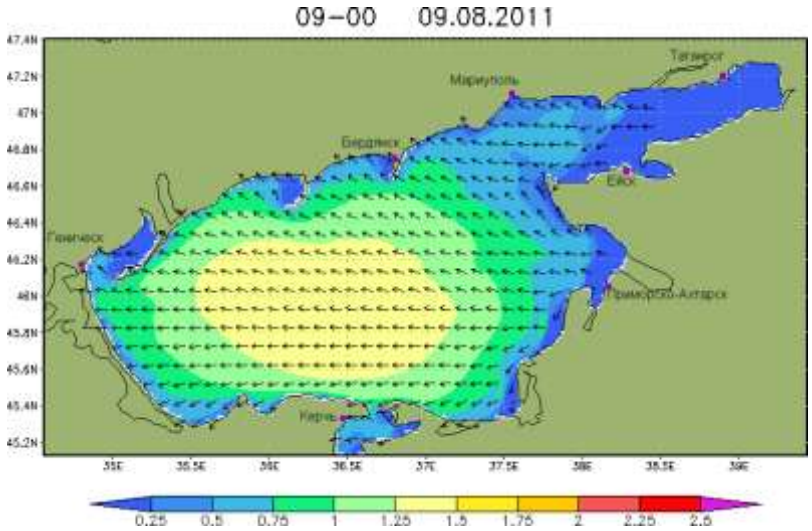


Рис. 2. Прогноз параметров ветрового волнения в Азовском море на 9 час вперёд от 00 часов по Гринвичу 09.08.2011
Высота преобладающих волн и направление их распространения

Как известно, высота волн 3%-ной обеспеченности, принятая в отечественной практике для оценки степени волнения и назначения ограничений по условиям плавания судов, связана с высотой значительных (преобладающих) волн зависимостью $h_{3\%} = 1{,}32\, h_{1/3}$. Использование в ЕСИМО и в Правилах РРР [1] разных показателей, характеризующих интенсивность морского волнения, вносит определённые неудобства в пользование прогностическими картами.

В соответствии с ЕСИМО прогноз рассчитывается ежесуточно по данным наблюдений, приведенным к 00 час по Гринвичу. Глубина прогноза – до 72 часов с интервалом 3 или 6 часов. Технологическая линия прогнозов волнения разработана совместно Гидрометцентром России и Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ). Расчеты прогнозируемых элементов волнения выполняются по модели ветрового волнения, разработанной в ААНИИ. Авторами модели являются Лавренов И.В., Дымов В.И., Пасечник Т.А., Давидан И.Н. Оперативный выпуск прогнозов волнения осуществляется в рамках автоматизированной системы обработки оперативной информации на основе прогностических полей ветра, вычисляемых по глобальной спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России. ЕСИМО пока используется в опытном режиме. Оценки погрешности прогнозов находятся на стадии исследования.

Методика прогнозирования параметров волнения постоянно совершенствуется. Однако, достоверной методики оценки погрешностей прогнозирования пока нет. Поэтому в данной статье использован приближённый подход к решению задачи, ориентированный, в основном, на качественный анализ влияния погрешностей прогноза на волновые изгибающие моменты.

В соответствии с [11, рис. 2], соотношение между прогнозируемой высотой волны 3%-ной обеспеченности $h_{3\%}^{пр}$ и наибольшей фактической высотой волны 3%-ной обеспеченности $h_{3\%}$ (при высотах прогнозируемых волн в пределах $h_{3\%}^{пр} = 1 \div 4\,м$) может быть принято по кривой, полученной Крыжевичем Г.Б. (табл. 4).

В основу рекомендаций, изложенных в [11], положены результаты анализа испытаний судов, проведённых на Чёрном и Балтийском морях.

Таблица 4

Прогнозируемые и максимальные фактические высоты волн 3%-ной обеспеченности по [11, рис 2]

$h_{3\%}^{пр}$, м	1,0	2,0	3,0	4,0
$h_{3\%}^{\max}$, м	2,50	3,30	4,10	4,90

В табл. 5, показана зависимость между фактической и прогнозируемой высотами волн 3%-ной обеспеченности по данным измерений параметров волн в Северной Атлантике при высотах прогнозируемых волн $h_{3\%}^{пр} = 3 \div 6{,}5\,м$.

На основании табл. 4 и табл. 5 получен точечный график зависимости между наибольшей фактической $h_{3\%}^{\max}$ и прогнозируемой высотой волны (рис. 3). Линия его тренда выражается формулой

$$h_{3\%}^{\max} = 0{,}84\, h_{3\%}^{пр} + 1{,}36 \qquad (2)$$

Формула (2) может быть представлена также в виде

$$h_{3\%}^{\max} = k_{пр}\, h_{3\%}^{пр} \qquad (3)$$

где $k_{пр}$ – коэффициент, учитывающий достоверность прогноза волнения, определяемый по формуле (4) и рис. 4

$$k_{пр} = 0{,}84 + \frac{1{,}36}{h_{3\%}^{пр}} \qquad (4)$$

Расчётное отношение между прогнозируемыми $h_{3\%}^{пр}$ и наибольшими фактическими высотами волн $h_{3\%}^{\max}$ показано в табл.6.и на рис. 4.

Таблица 5

Зависимость между фактической и прогнозируемой высотой волны 3%-ой обеспеченности в Северной Атлантике

№ опыта	Прогнозируемая высота волны, $h_{3\%}^{пр}$, м	Фактическая высота волны, $h_{3\%}$, м
1	4,8	5,7
2	5,9	6,8
3	4,0	4,6
4	4,6	5,1
5	3,4	4,0
6	3,0	3,4
7	4,2	4,8
8	4,4	4,9
9	6,5	6,8
10	6,3	6,5
11	3,6	4,0
12	4,0	4,4
13	3,8	4,4

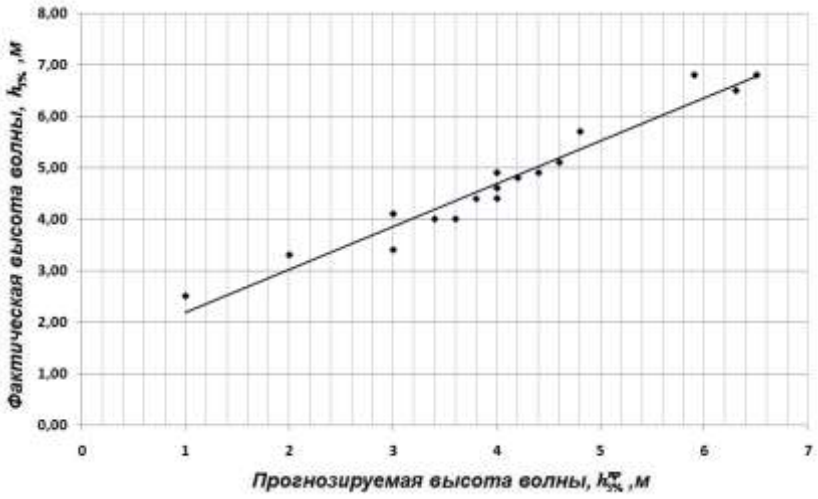


Рис. 3. Зависимость между наибольшей фактической и прогнозируемой высотой волны

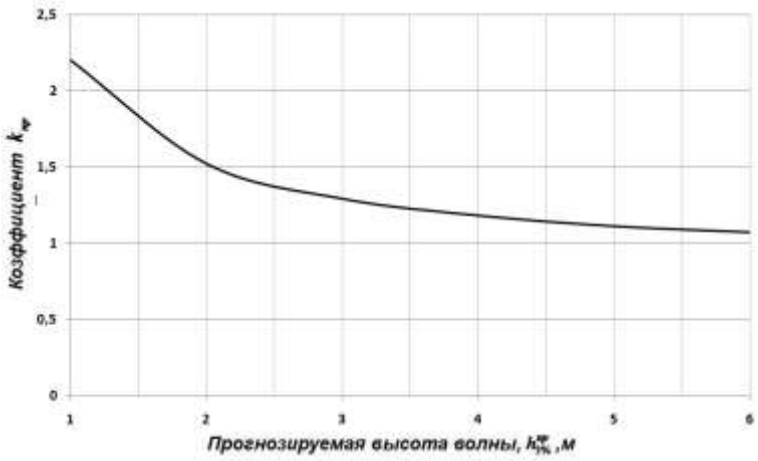


Рис. 4. Коэффициент $k_{пр}$, учитывающий достоверность прогноза волнения

Суда смешанного плавания эксплуатируются на относительно коротких волнах. Поэтому, волновой изгибающий момент будем вычислять при «косой» постановке на двухмерное нерегулярное волнение. Положение судна по отношению к волнению примем наиболее неблагоприятным с позиций общего изгиба.

Волновой изгибающий момент на миделе при произвольной высоте волны $h_{3\%}$, м, в стационарном режиме в соответствии с [6], [7], [8] можно представить в виде

$$M_B = 0{,}026\ \gamma\ \ k_\delta\, k_T\, k_B\, B L^2\, h_{3\%}. \qquad (5)$$

где γ – удельный вес воды, кН/м^3;

$k_\delta = \exp[-1{,}6(1-\delta)]$ – коэффициент влияния полноты водоизмещения;

δ – коэффициент полноты водоизмещения.

Таблица 6

Расчётное отношение между прогнозируемыми и наибольшими фактическими высотами волн

$h_{3\%}^{пр}$, м	1,0	1,5	2,0	2.5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0
$h_{3\%}^{\max}$, м	2,2	2,6	3,0	3,5	3,9	4,3	4,7	5,6	6,4
$k_{пр}$	2,20	1,73	1,50	1,40	1,30	1,23	1,18	1,12	1,07

$k_T = \exp(-\dfrac{6\pi T\delta}{m\, h_{3\%}(2\delta+1)})$; – коэффициент влияния осадки судна;

$k_B = \dfrac{1-\exp(-\dfrac{\pi B\delta}{m\, h_{3\%}})}{\dfrac{\pi B\delta}{m\, h_{3\%}}}$ – коэффициент влияния ширины судна;

L, B, T – длина, ширина и осадка судна, м;

$m = \dfrac{\lambda_{ср}}{h_{3\%}}$ – отношение средней длины волны к фактической высоте волны 3%-ой обеспеченности.

На основании исследований [8] значение m может быть определено по приближённой формуле

$$m = 10 + 2h_{3\%} - 0{,}15\, h_{3\%}^2 \qquad (6)$$

На рис. 5 показан, в качестве примера, график изменения волновых изгибающих моментов M_B в стационарном режиме волнения в зависимости от прогнозируемой высоты волны $h_{3\%}^{пр}$ для судна пр.507Б в полном грузу.

Рассмотрены два изгибающих момента:

– $M_B^{\max}$– момент, вычисленный с учётом погрешности прогноза, при фактической максимальной высоте волны $h_{3\%}^{\max}$, определяемой по формуле (2);

– M_B – момент, вычисленный без учёта погрешности прогноза, когда фактическая высота волны $h_{3\%}$ равна прогнозной высоте $h_{3\%}^{пр}$.

Как следует из рис. 5 и табл. 7, при учёте погрешностей прогноза волновые изгибающие моменты на стационарном волнении растут быстрее, чем высоты волн, их вызвавших. Это объясняется тем, что с ростом высоты волны $h_{3\%}$ в формуле (5) возрастают также коэффициенты k_T (поправка Смита) и k_B (поправка Кламана), т.е. уменьшается эффект гашения волн корпусом судна.

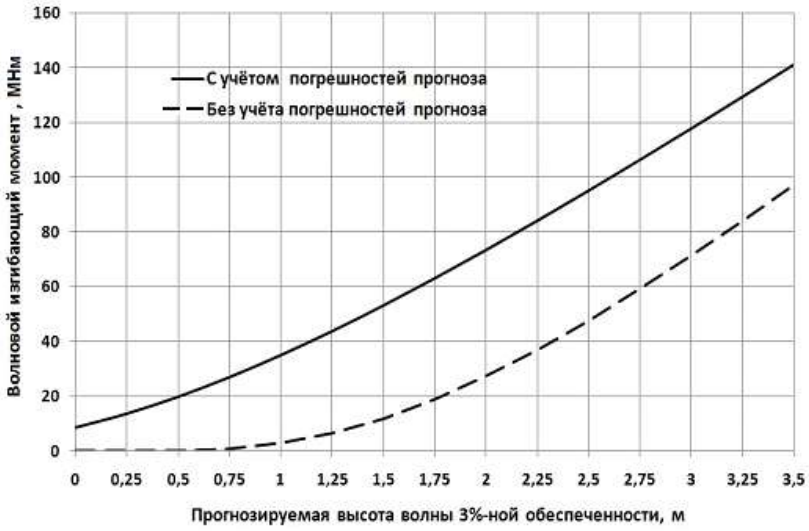


Рис. 5. Волновые изгибающие моменты M_B в стационарном режиме волнения для судна пр.507Б

Таблица 7

Отношения $h_{5\%}^{\max} / h_{5\%}^{пр}$ и $M_B^{\max} / M_B$ для пр.507Б

Класс судна	О-ПР 2,0	М-ПР 3,0	М-СП 3,5
$h_{3\%}^{пр}$, м	2,0	3,0	3,5
$h_{5\%}^{\max}$, м	3,0	3,9	4,3
$h_{5\%}^{\max} / h_{5\%}^{пр}$	1,50	1,30	1.23

Класс судна	О-ПР 2,0	М-ПР 3,0	М-СП 3,5
M_B, МН·м	27,0	71,4	97,0
$M_B^{\max}$, МН·м	73,0	117,0	141,0
$M_B^{\max} / M_B$	2,70	1,64	1,45

Расчётный волновой изгибающий момент при долгосрочном распределении, вычисленный с учётом достоверности прогноза волнения, представим в виде

$$M_B^p = \gamma \ 0{,}026 \ k_{об} \ k_\delta \ [k_T][k_B] B L^2 [h_{3\%}^{\max}], \tag{7}$$

где $k_{об}$ – коэффициент, учитывающий обеспеченность волнового изгибающего момента при долговременном распределении;

$[k_T]$,$[k_B]$ – значения коэффициентов k_T и k_B при $h_{3\%} = [h_{3\%}^{\max}]$

Обеспеченность волнового изгибающего момента в стационарном режиме волнения

$$p\,(M_B) = \exp\,[-\frac{(M_B^p)^2}{2\sigma_M^2}], \tag{8}$$

В качестве частотного спектра волнения примем спектр 2-го международного конгресса по конструкции и прочности судов.

$$S_\zeta(\omega) = (\frac{h_{3\%}^{пр}}{2})^2 \frac{0{,}266}{\omega_{ср}} \bar{S}(\frac{\omega}{\omega_{ср}}), м^2 с \tag{9}$$

где ω - круговая частота прогнозной волны, 1/с;

$\omega_{ср} = \dfrac{1{,}93}{\sqrt{[h_{3\%}^{пр}]}}$ – средняя круговая частота спектра, 1/с.

Безразмерная часть спектра

$$\bar{S}(\frac{\omega}{\omega_{ср}}) = 0{,}947(\frac{\omega}{\omega_{ср}})^{-5} \exp[-0{,}44(\frac{\omega}{\omega_{ср}})^{-4}], \tag{10}$$

Амплитудно-частотная характеристика волнового изгибающего момента

$$a_M = 0{,}052 \ \gamma \ k_\delta \ k_T \ k_B \ B L^2 \tag{11}$$

Дисперсия волнового изгибающего момента

$$D_M = \int_0^\infty S_M(\omega) d\omega = \int_0^\infty a_M^2(\omega) \ S_\zeta(\omega) d\omega \tag{12}$$

Стандарт волнового изгибающего момента

$$\sigma_M = \sqrt{D_M} = 0{,}266 \cdot 0{,}026 \ \gamma k_\delta \ k_T \ k_B \ B L^2 \ h_{3\%} \tag{13}$$

Подставив в формулу (8) формулы (7) и (13), получаем

$$p\,(M_B) = \exp\,[-7{,}07(\frac{k_{об}\;\;[k_T]\,[k_B]\;\;[h_{3\%}]}{k_T k_B h_{3\%}})^2\,] \qquad (14)$$

Условная плотность распределения фактических высот волн $h_{3\%}$ при прогнозируемых высотах волн $h_{3\%}^{пр}$ может быть аппроксимирована законом распределения Релея. Тогда обеспеченность (вероятность превышения) фактических высот волн $h_{3\%}$ при заданных прогнозируемых высотах $h_{3\%}^{пр}$ будет равна

$$p(\frac{h_{3\%}}{h_{3\%}^{пр}}) = \exp[-\frac{(h_{3\%})^2}{8\,D_{\varsigma}^{пр}}]\,, \qquad (15)$$

где $D_{\varsigma}^{пр}$ – второй центральный момент распределения (дисперсия) ординат прогнозируемого волнения.

При этом

$$D_{\varsigma}^{пр} = 0{,}143\left(\frac{h_{3\%}^{пр}}{2}\right)^2. \qquad (16)$$

Подставив (16) в (15), получаем

$$p(\frac{h_{3\%}}{h_{3\%}^{пр}}) = \exp[-3{,}5\left(\frac{h_{3\%}}{h_{3\%}^{пр}}\right)^2\,]. \qquad (17)$$

Плотность вероятности распределения относительных фактических высот волн в бассейне соответствующего разряда за длительный период времени

$$f\,(\frac{h_{3\%}}{h^*}) = 4{,}35\,(\frac{h_{3\%}}{h^*})^{0{,}45}\exp[-3(\frac{h_{3\%}}{h^*})^{1{,}45}]\,, \qquad (18)$$

где h^* – высота волны 3%-ой обеспеченности для режима 5%-ой обеспеченности (табл. 8), характеризующая бурность бассейна.

Таблица 8

Значения $h*$

Разряд бассейна	М-СП	М-ПР	О-ПР
$h*$, м	3,50	2,50	2,00

Полновероятностная обеспеченность волнового изгибающего момента

$$Q(M_B^p) = \int_0^{[h_{3\%}^{\max}]} p(M_B)\,p\,(\frac{h_{3\%}}{h_{3\%}^{пр}})\;f\,(\frac{h_{3\%}}{h^*})\;d(h_{3\%})\,, \qquad (19)$$

где $[h_{3\%}^{\max}] = 0{,}84[h_{3\%}^{пр}] + 1{,}36$ – допускаемая фактическая высота волны,

Выполненные расчёты показали следующее:

– обеспеченность $Q(M_B^p)$ практически не зависит от состояния загрузки судна (в грузу или порожнём);

– для разных судов одного класса обеспеченность $Q(M_B^p)$ практически одинакова.

На рис. 6 приведены кривые $Q(M_B^p) = f(k_{об})$ для судов классов «М-СП 3,5», «М-ПР 3,0» и «О-ПР 2,0», вычисленные с учётом погрешностей прогноза волнения, а на рис. 7 показаны аналогичные зависимости для судов разных классов без учёта погрешностей волнения. Как следует из рис. 7, при достоверном прогнозе волнения кривые, принадлежащие разным классам судов, практически совпадают.

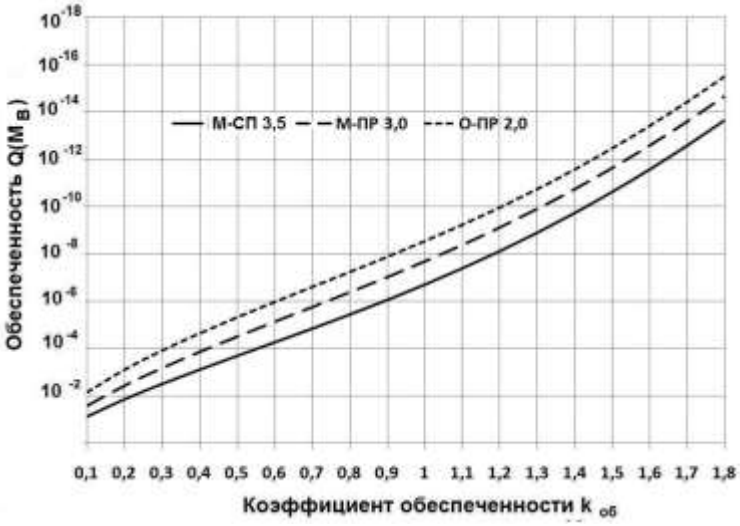


Рис. 6. Полновероятностная обеспеченность волнового изгибающего момента M_B^p с учётом погрешностей прогноза волнения

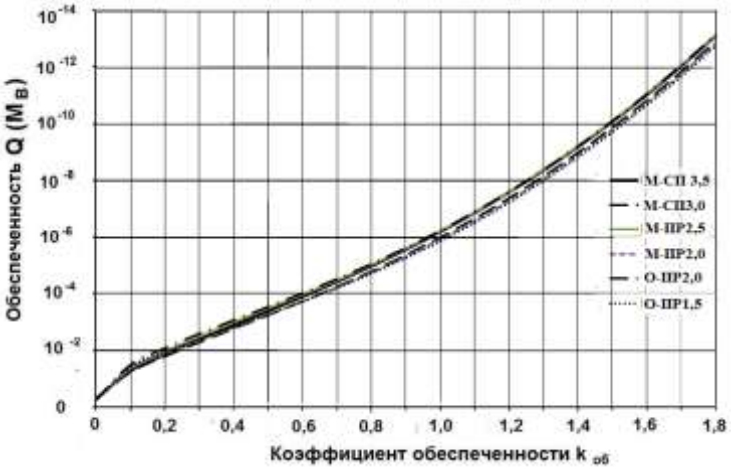


Рис. 7. Полновероятностная обеспеченность волнового изгибающего момента M_B^p без учёта погрешностей прогноза волнения

Кривые обеспеченности с достаточной точностью могут быть аппроксимированы линейными зависимостями

Пусть

$$Q(M_B^p) = 10^{-p} \tag{20}$$

Тогда показатель степени p определится из формулы

$$p = a\,k_{об} + b\,, \tag{21}$$

в которой значения постоянных a и b при учёте погрешностей прогноза зависят от класса судна.

Отсюда коэффициент $k_{об}$ при заданной обеспеченности $Q(M_B^p)$ определится по формуле

$$k_{об} = \frac{b-p}{a} \tag{22}$$

В качестве примера использования полученных зависимостей в табл. 9 приведены результаты вычисления по формуле (7), с учётом (20), (21) и (22), расчётных волновых изгибающих моментов M_B^p для судна проекта 507Б при обеспеченности $Q(M_B) = 10^{-6}$.

Таблица 9

Волновые изгибающие моменты M_B^p судна пр.507Б при $Q(M_B^p) = 10^{-6}$

Класс судна	О-ПР 2,0	М-ПР 3,0	М-СП 3,5
$[h_{3\%}^{пр}]$, м	2,0	3,0	3,5
$[h_{5\%}^{\max}]$, м	3,0	3,9	4,3
a	7,42	7,33	7,08
b	1.44	0,71	0,07
$k_{об}$ при $Q(M_B^p) = 10^{-6}$	0,61	0,72	0,88
$M_B^{\max}$, МН·м	73,0	117,0	141,0
$M_B^p = k_{об}\,M_B^{\max}$, МН·м	43,8	84,2	124,1
M_B^p по Правилам [1], МН·м	46,3	77,8	122,4

Полученные расчётные значения M_B^p практически совпадают со значениями волнового изгибающих моментов $M_B^p = M_{ДВ}/k_2$, регламентируемых Правилами [1] Российского Речного Регистра ($M_{ДВ}$ – дополнительный волновой изгибающий момент, $k_2 > 1$ – коэффициент учитывающий удар волны в носовую оконечность).

Список литературы

[1] Российский Речной Регистр. Правила (в 4-х т.), т. 4. Москва, 2008. – 318 с.
[2] Абузяров З.К. Вопросы оперативного применения численных прогностических моделей ветрового волнения в Гидрометцентре России. method.hydromet.ru/publ/tr/tr339/ab.
[3] Бойцов Г.В. Вероятностные методы в расчётах прочности и надёжности судовых конструкций. Монография / Г.В. Бойцов, Г.Б. Крыжевич //ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. СПб, 2007. 264 с.
[4] Бойцов Г.В. Зависимость безопасности судов смешанного плавания от достоверности прогноза волнения и закономерностей длительностей штормов/Г.В. Бойцов, А.В. Бухановский., Л.И. Лопатухин.// Тр.ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2006. вып. 28 (312). – с. 4–15.
[5] Благовещенский С.Н. Справочник по статике и динамике корабля. В двух томах. Изд. 2-е,

перераб. и доп. Т. 2. Динамика (качка) корабля./ С.Н. Благовещенский. А.Н. Холодилин. Л., «Судостроение». 1975, 176 с.
[6] Гирин С.Н. О влиянии формы частотного спектра волнения на долговременное распределение и величину волновых изгибающих моментов./С.Н.Гирин. А.М Фролов // Сб. «К 100-летию начала классификации речных судов», Российский Речной Регистр, М., 2000, с. 111–123.
[7] Гирин С.Н. К вопросу о прочности и условиях эксплуатации судов смешанного плавания, проектируемых на класс Российского Речного Регистра / С.Н. Гирин, А.М. Фролов // Труды ВГАВТ. – Н. Новгород, 2000. – вып. 200. – с. 53–63.
[8] Гирин С.Н. О влиянии некоторых волнообразующих факторов на изгибающие моменты судов смешанного плавания / С.Н. Гирин, А.М. Фролов // Вестник ВГАВТ. – Н. Новгород, 2007.– вып. 22. – с. 113–121.
[9] Екимов В.В. Вероятностные методы в строительной механике корабля. – Л: Судостроение, 1966. – 328 с.
[10] Короткин Я.И., Рабинович О.Н., Ростовцев Д.М. Волновые нагрузки корпуса судна. – Л.: Судостроение, 1987. – 236 с.
[11] Крыжевич. Г.Б. Особенности обеспечения безопасности и ресурса конструкции СДПП, имеющих эксплуатационные ограничения по интенсивности волнения //Тр. ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова. – 2006. вып. 28 (312). – с. 53–59.
[12] Лаппо Д.Д. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения / Д.Д. Лаппо, С.С. Стрекалов., В.С. Завьялов. – Л.: ВНИИГ им. В.Е. Веденеева. 1990, с. 424.
[13] Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане. Оперативная модель ЕСИМО. hmc.hydromet.ru/sea

INFLUENCE OF SEA STATE FORECAST VALIDITY ON THE SIZE OF WAVE-INDUCED BENDING MOMENTS OF MIXED RIVER-SEA-GOING SHIPS CLASSED BY RUSSIAN RIVER REGISTER

S.N. Girin, A.M. Frolov

Based on literary sources this article demonstrates that present sea state forecasts being made for basins operating mixed river-sea-going ships may be incorrect leading to a fatal result. An adjustment technique has been proposed of the relationships obtained previously by the authors for wave-induced bending moments of this type of ships with an allowance for sea state forecast error.

УДК 629.12:539.3/.4

***М.В. Горохова**, доц., ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а.
***А.А. Пылаева**, студентка НГУ им. Лобачевского.*
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ ANSYS НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ МЕМБРАНЫ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ

В данной статье рассмотрено численное решение задачи о выявлении одноосных зон сжатия для мягкой оболочки (мембраны). Решение проводилось с использованием программного комплекса ANSYS. Была построена расчетная модель мембраны и проведе-

ны расчеты при ее статическом нагружении. Исследовано влияние на решение задачи жесткости упругого основания. Проведено сравнение численного и аналитического решений.

Постоянные инновации и достижения в области техники ставят новые задачи теоретического и практического исследования работоспособности машин и их элементов. Повышение их долговечности и надежности является важнейшим фактором, влияющим на рост конкурентоспособности конструкций и на прямую связано с достоверными расчетами «проблемных» мест конструкции. Метод конечных элементов (МКЭ) является наиболее эффективным широко используемым современным средством численного решения таких задач. В настоящее время существует достаточно много программных продуктов, основанных на МКЭ и предназначенных для решения задач отдельных классов. Поэтому можно подобрать программный продукт для решения практически любой инженерной задачи. Но при комплексном расчете инженерных конструкций целесообразно иметь для расчетов универсальный программный комплекс. Одним из таких мощных современных программных продуктов, реализующих МКЭ, является программный комплекс ANSYS.

Библиотека конечных элементов системы ANSYS содержит более 200 различных типов элементов, каждый из которых предназначен для моделирования определенных видов элементов конструкции, материалов и их свойств, а так же различных видов нагружения и деформации [3]. В данной работе для расчета мембран использовался элемент оболочки –SHELL 63.

Особенностью элементов оболочек, которые используются в программном комплексе ANSYS, является то, что в этих элементах исходные нормали к серединным поверхностям остаются прямыми, но не обязательно сохраняют ортогональность к серединной поверхности деформированной модели элемента. В результате напряжения по толщине оболочки остаются постоянными или изменяются линейно. Однако, если рассчитывается многослойная композитная оболочка, то положение о линейном изменении деформаций в плоскости элемента оболочки в явном виде не применимо. В этом случае для композитных оболочек следует применять метод подмоделирования. Четких правил о границах применения элементов оболочки инструкциях по расчету в комплексе ANSYS не дается. Тем не менее, если конструкция демонстрирует поведение, подобное оболочке, для ее расчета можно использовать элемент оболочки. Комплекс не проводит проверки на превышение толщиной элемента ширины оболочки, поскольку такой элемент может быть частью мелкой сетки, построенной для большой модели, считаемой оболочкой. Если начальная форма модели является искривленной, отношение радиуса к толщине существенно, потому что распределение деформаций по толщине может не являться линейно изменяющимся.

Элемент SHELL63 оболочки [3], имеющиеся в программном комплексе, имеет шесть степеней свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей X,Y,Z узловой системы координат и повороты вокруг осей X,Y,Z узловой системы координат. Важной особенностью элемента является то, что элемент может работать с изменением матрицы жесткости при приложении больших нагрузок и больших перемещений. Эффект изменения жесткости при приложении давления в элементе учитывается автоматически. Элемент имеет возможность поддержки вырождения элемента в треугольную форму. При этом данный элемент может использоваться для расчета трехслойных и многослойных оболочек.

Геометрия, расположение узлов и координатная система элемента SHELL63 показаны на рис. 1. Направление ориентации ортотропного материала связано с системой координат элемента. Ось X системы координат элемента может быть повернута на угол.

Для указания толщины и другой информации для элемента можно использовать как геометрические характеристики, а так же поперечные сечения. При этом для однослойной оболочки указывают только геометрические характеристики. Толщина

элемента может быть переменной, при этом она считается гладко изменяющейся по площади элемента и задается в четырех узлах. Если элемент имеет постоянную толщину, то требуется указать только значение TK(I).

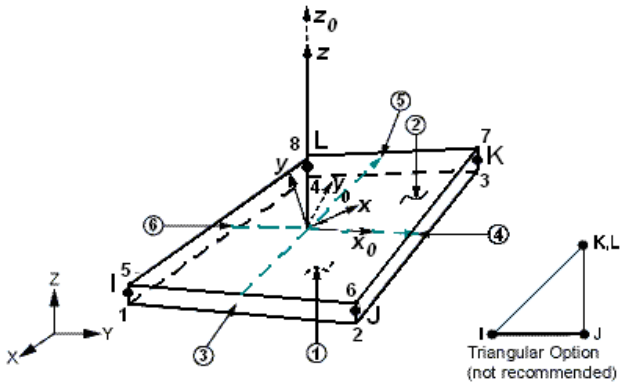


Рис. 1. Элемент SHELL63

Давления на элемент могут быть указаны в качестве поверхностных нагрузок на гранях, как показано на рис. 1. Положительное давление направлено внутрь элемента. Давления, прикладываемые на ребрах, имеют размерность силы, отнесенной к единице длины. Поперечное давление может быть эквивалентно элементарным (сосредоточенным) нагрузкам, прикладываемым в узлах (при KEYOPT(6)=0) или распределено по граням элемента (при KEYOPT(6)=2). Признак KEYOPT(1) применяется для удаления и матрицы жесткости при необходимости мембранной или изгибной жесткости.

Кроме этого важным свойством для элемента SHELL63 является наличие возможности задания такой опции, как жесткость упругого основания (EFS). Она определяется как давление, требуемое для создания единичного перемещения основания по нормали. Если жесткость упругого основания указывается равной нулю или меньше, она игнорируется.

Целью данного исследования было решение задачи о прямоугольной мембране, загруженной распределенным равномерно давлением с помощью системы ANSYS при использовании элемента SHELL63 и исследование некоторых опций элемента и их влияние на результаты решения.

В работе проводилось исследование поведения тонкой оболочки, типа пленки или ткани, под действием равномерно распределенного давления q, с целью выявления зон сжатия и их размеров. Такие оболочки относятся к мягким и имеют нулевую жесткость на изгиб и поперечный сдвиг. Особенностями таких оболочек и конструкций изготовленных из них является прочность при очень маленьком весе, способность к значительному и быстрому формоизменению, простота изготовления, компактность в упаковке и т.п. Использование в конструкциях традиционных, а так же современных высокопрочных тканей способствует все большему расширению области их применения.

Примером мягкооболочечных конструкций могут служить разделяющие две среды мембраны, демпферы (например, автомобильная подушка безопасности), парашют, скег судна на воздушной подушке. При эксплуатации мягких оболочек наиболее ярко проявляются их такие специфические особенности, как сильная изменяемость формы, возможность складкообразования, большая деформативность материала, его ортотропия. Важной особенностью мягких оболочек является то, что они плохо сопротивляются сжатию и изгибу, поэтому при наличии сжимающих нагрузок на их поверхности образуются складчатые области с большим числом складок. Это обстоятельство привело к расчетной модели мембраны, в которой такие складчатые области рассматриваются как гладкие поверхности, состоящие из абсолютно гибких нерастя-

жимых нитей. Предполагается, что оболочка натянута только вдоль нитей. Каждая нить является идеализацией складки, так что деформация оболочки заключается в том, что вдоль некоторого семейства кривых происходит сжатие поверхности.

Проведено численное решение такой мембраны с использованием программного комплекса ANSYS для выявления зон сжатия (зон складок) при действии на оболочку равномерного давления q, результаты расчета сравнивались с аналитическим решением данной задачи.

При аналитическом решении рассматривалась закрепленная по контуру квадратная мембрана со стороной a и толщиной h, под давлением q – рис. 2.

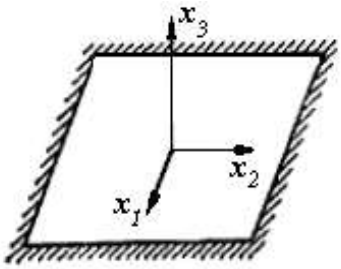


Рис. 2. Схема рассчитываемой пластины

Частный случай этой задачи, квадратную пластину, методом сеток рассмотрел в своем исследовании Е.П. Ковпак [1]. Для аппроксимации им использовалась консервативная схема второго порядка. Полученная при этом система нелинейных алгебраических уравнений решалась методом простой итерации. Отвечающие сеткам 20x20 и 30x30 значения прогибов и напряжений почти совпали, вплоть до прогибов порядка стороны элемента.

По результатам аналитического расчета были построены профили мембраны. На рис. 3*а* показан профиль сечения мембраны x_2= 0, а на рис. 3*б* – профиль x_1= x_2 (по диагонали) при разных значениях давления q.

На рис. 4 представлено распределение напряжений в сечении x_1=x_2, полученное по результатам аналитического решения.

Из рис. 4 видно, что при умеренных нагрузках максимальные напряжения возникают на некотором расстоянии от центра мембраны, а с ростом нагрузки сдвигаются к центру. На рис.4 видно так же наличие одноосных зон (зон сжатия) в углах мембраны.

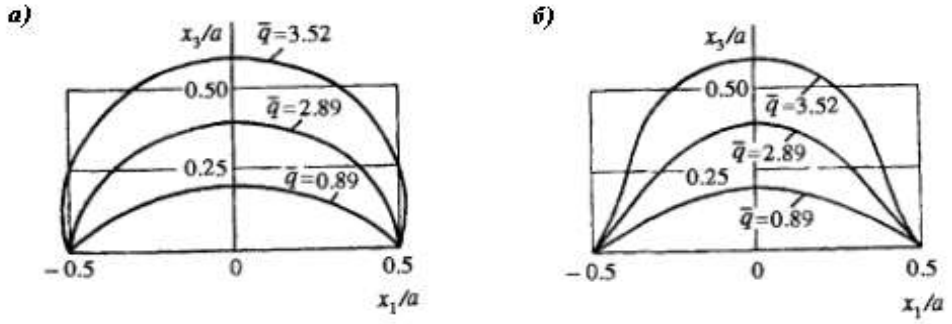


Рис. 3. Профили сечений мембраны при разных давлениях

а) в сечении x_2 = 0; б) в сечении x_1= x_2.

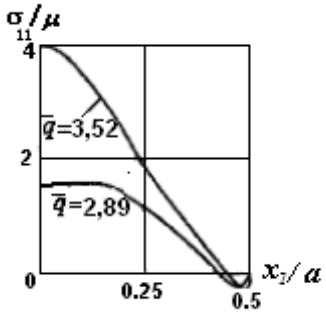


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений в сечении x_1=x_2 по результатам аналитического решения

Все рисунки выполнены в безразмерных величинах:

безразмерное давление: $\overline{q} = \dfrac{q}{\mu} \cdot \dfrac{a}{h}$,

где q – давление на пластину,

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)},$$

ν – коэффициент Пуассона,

E – модуль упругости первого рода;

безразмерные координаты $\overline{x}_i = \dfrac{x_i}{a}, i = 1,3$.

Аналогичная задача была решена с использованием программного комплекса ANSYS и элемента SHELL63 и построены соответствующие графики, которые позволили выявить зоны сжатия в мембране и размер этих зон. Расчет выполнялся для квадратной пластины со стороной a = 1,0 м, имеющей постоянную толщину h= 0,001 м. Контур пластины был закреплен по всем направлениям. На поверхности пластины действовало равномерно распределенное давление q = 250 МПа. Изотропные свойства пластины – $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0,3$. Так как задача симметричная, то все расчеты проводились для одной четверти исходной пластины .

Заданное давление на пластину рассчитывалось, исходя из формулы $\overline{q} = \dfrac{q}{\mu} \cdot \dfrac{a}{h}$, при $\overline{q} = 2,89$. Величина давления была взята такой же, как и аналитическом решении. Так как рассматривается мягкая оболочка (оболочка, имеющая нулевую жесткость на изгиб и поперечный сдвиг), поэтому моментами и поперечными силами на гранях конечного элемента пренебрегали.

В процессе расчета, рассматриваемой задачи в программном комплекса ANSYS, использовались рекомендации, изложенные в [4].

В процессе численного решения задачи, изменялась такая опция элемента SHELL63, как жесткость упругого основания и решалось две задачи:

– мембрана с жесткостью упругого основания 50 МПа и загружена распределенным давлением;

– мембрана загруженная таким же распределенным давлением, но с жесткостью упругого основания равной нулю.

Сравнивались результаты этих численных решений между собой и с аналитическим решением. Кроме этого численные решения выполнялись при различных конеч-

но-элементных сетках. Результаты расчетов в системе ANSYS представлялись в виде изображения деформированного и недеформированного положения мембраны (рис. 5), а так же поля распределения напряжений в мембране (рис. 6).

На рис. 6 видно наличие зон сжатия в мембране, что соответствует теоретическому исследованию.

Для более наглядного представления результатов расчета для разных сеток и разных значений жесткости упругого основания мембраны были построены графики профиля сечения мембраны y=0 и профиля y=x.

Численное решение задачи для мембраны с ненулевой жесткостью упругого основания проводилось для трех вариантов разбивки ее на конечные элементы. За основу была сетка 30x30 элементов.

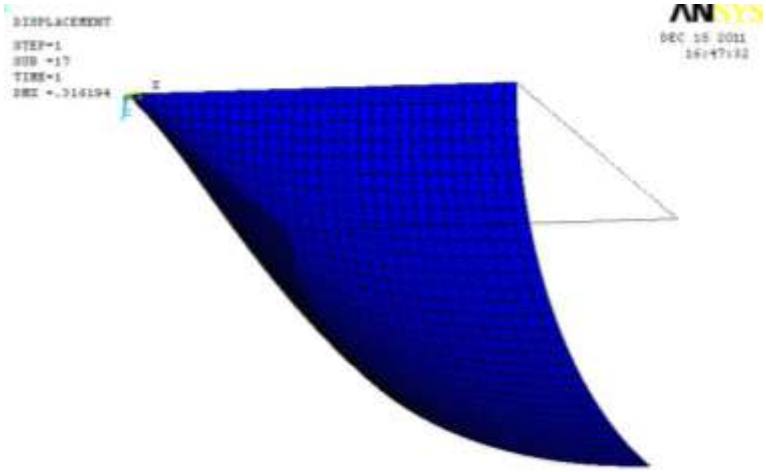


Рис. 5. Карта деформаций мембраны по результатам численного расчета

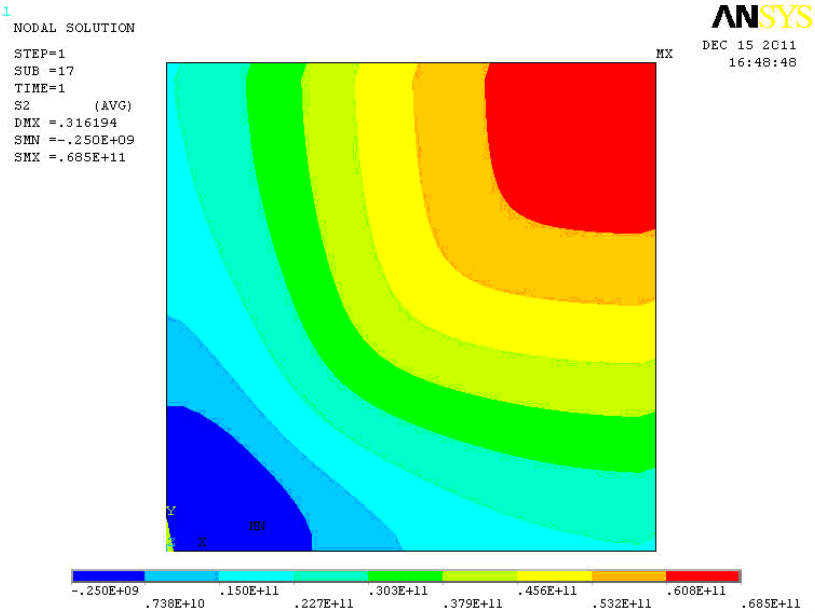


Рис. 6. Карта распределения напряжений в мембране
по результатам численного решения

Результаты расчета для данной разбивки мембраны на элементы представлены в виде графиков прогиба мембраны для сечения y=0 (рис. 7) и сечения y=x (рис. 8), а так же графика распределения напряжений в сечении y=x (рис. 9). Все эпюры (графики) построены непосредственно в программном комплексе, задав специальные опции в соответствующих вкладках меню.

По результатам аналитического решения, приведенного на рис. 4, зоны сжатия в мембране находятся на расстоянии x=0,066 м от угла пластины, а в численном решении это расстояние составило 0,095 м. Поэтому количество элементов на расчетной схеме оболочки было увеличено в каждом направлении в два раза. Все расчеты выполнены повторно, но уже с сеткой 60x60 элементов.

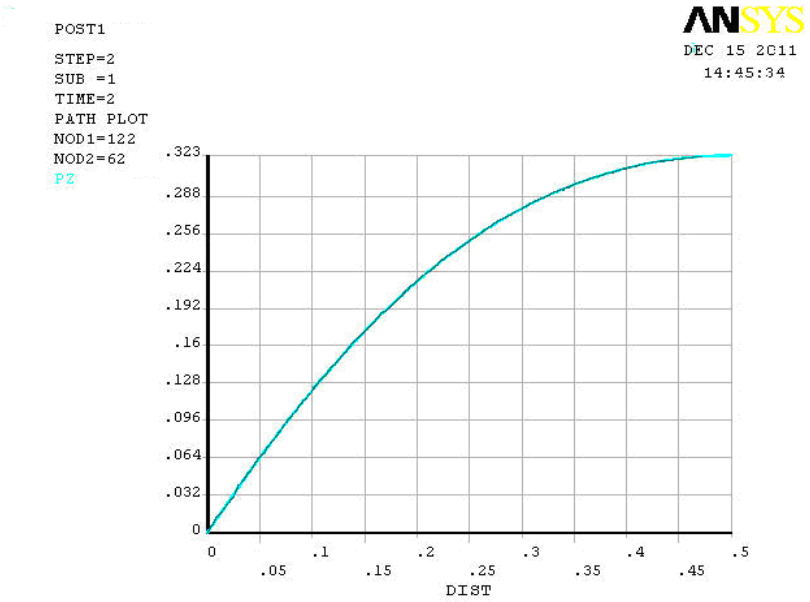


Рис. 7. График прогиба мембраны в сечении y=0 по результатам численного решения

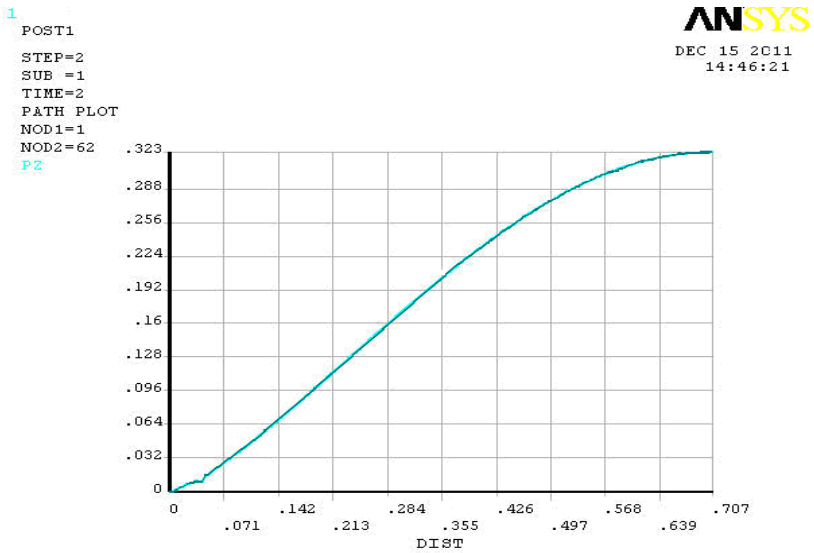


Рис. 8. График прогиба мембраны в сечении y = x по результатам численного решения

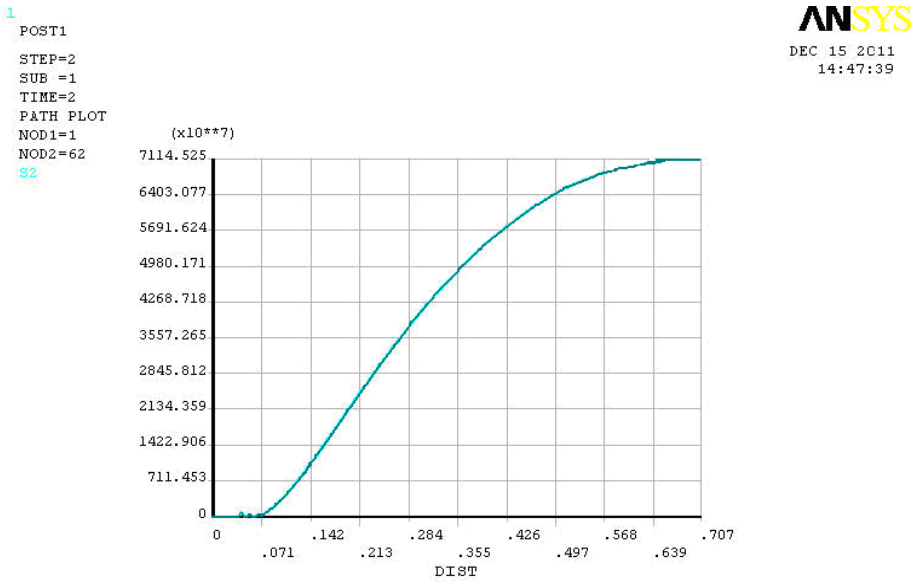


Рис. 9. Эпюра распределения напряжений, в сечении мембраны *y=x*, построенная по результатам численного расчета

По результатам этого расчета построены аналогичные графики. При этом зоны сжатия находились уже на расстоянии x = 0,089 м от угла пластины. Очевидно, что для сходимости численного решения к аналитическому, необходимо было еще раз увеличить число конечных элементов. Поэтому по сравнению с начальным делением число элементов в каждом направлении было увеличено в 4 раза, то есть рассматривалась сетка 120x120 элементов. Для новой модели по результатам расчета строились те же графики. Зоны сжатия по результатам расчетов находились на расстоянии 0,071 м от угла пластины, что соответствует результатам аналитического решения.

Численное решение задачи для мембраны с нулевой жесткостью упругого основания проводилось для начальной сетки 30x30 элементов. В аналитическом решении такой пластины так же имеются зоны сжатия, находящиеся на расстоянии x = 0,066 м от угла пластины. В полученном численном решении это расстояние x = 0,071 м, то есть погрешность значения лежит в пределах длины элемента сетки. Увеличение количества элементов в два раза (60x60) выявило наличие зоны сжатия на расстоянии x = 0,06 м. Это значение так же близко к точному, поэтому выполнять новый расчет в этой задаче не надо.

Для более наглядной проверки сходимости численного решения к аналитическом были построены графики зависимости длины зоны сжатия мембраны от количества элементов, на которые разбивается ее расчетная область (рис. 9).

Из построенных на рис. 10 графиков видно, что численное решение первой задачи сходится к аналитическому решению с увеличением количества элементов, на которые разбивается мембрана. Решение второй задачи, когда не учитывается жесткость упругого основания мембраны, на первом же шаге (сетка 30x30) близко к аналитическому. То есть использование такой опции элемента SHELL63, как жесткость упругого основания, значительно упрощает расчет и сокращает время вычислений, что важно при решении более сложных задач.

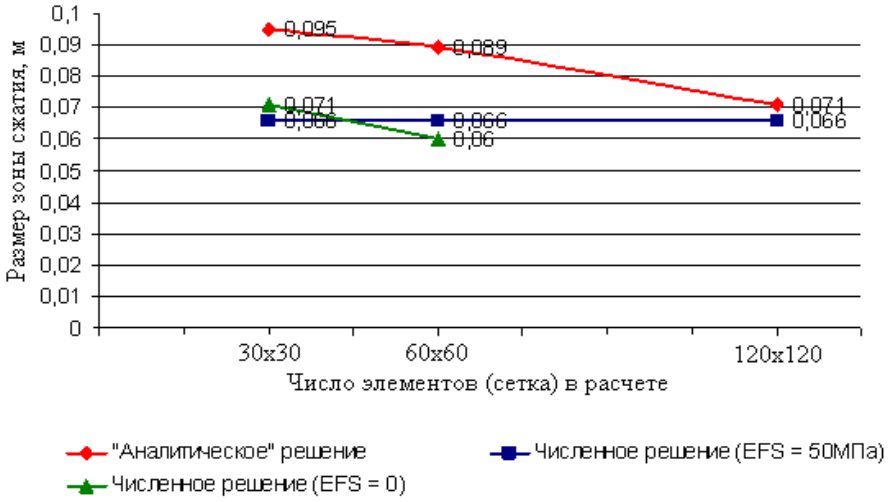


Рис. 10. Сравнительный анализ результатов сходимости численного решения к аналитическому

Кроме этого численное решение задачи с использованием программного комплекса ANSYS так же, как и аналитическое решение, выявило наличие в углах прямоугольной мембраны зон сжатия. А проведенные численные исследования позволили выявить некоторые особенности элемента SHELL63 (мягкая оболочка). Все это необходимо учитывать при решении более сложных задач с использованием элементов оболочки.

Список литературы

[1] Черных К.Ф., Кабриц С.А., Михайловский Е.И., Товстик П.Е., Шамина В.А. Общая нелинейная теория упругих оболочек. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2002. – 388 с.
[2] Кузьмина Р.П. Мягкие оболочки. – М.: изд-во «Факториал Пресс», 2005. – 256 с.
[3] Басов К.А. ANSYS справочник пользователя. – М.: ДМК – Пресс, 2005. – 640 с.
[4] Применение системы ANSYS к решению задач механики сплошной среды. Практическое руководство, под ред. Проф. А.К. Любимова. – Н. Новгород: изд-во ННГУ, 2006. – 227 с.

NUMERICAL MODELING OF THE SYSTEM ANSYS VOLTAGE-STRAIN STATE RECTANGULAR MEMBRANE UNDER THE ACTION UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD

M.V. Gorokhova, A.A. Pylaeva

In given article the numerical decision of a problem on revealing of zones of compression for a soft cover (membrane) is considered. The decision was spent with use of program complex ANSYS. The settlement model of a membrane has been constructed and calculations are carried out at static loading. Influence on the decision of a problem of rigidity of the elastic basis is investigated. Comparison of numerical and analytical decisions is spent.

УДК 629.12:629.572:532.5

П.В. Константинов, *магистрант, ННГУ им. Н.И. Лобачевского,*
В.В. Шабаров, *канд. тех. наук, доцент, ННГУ им. Н.И. Лобачевского,*
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЕВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СУДОВ НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ (СПК)

Приведена методика вычислительного эксперимента по определению гидродинамических характеристик изолированных крыльевых устройств судов на подводных крыльях (СПК) и результаты вычислительных экспериментов применительно к носовому крыльевому устройству (НКУ) судна на подводных крыльях «Олимпия». Результаты вычислительных экспериментов сопоставлены с результатами буксировочных испытаний в опытовом бассейне ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Результаты вычислительного и физического экспериментов удовлетворительно согласуются между собой. Работа содержит 6 страниц текста, 6 рисунков, список литературы содержит 10 наименований.
Ключевые слова: гидродинамические характеристики, судно на подводных крыльях (СПК), крыльевое устройство (КУ), опытовый бассейн, вычислительные эксперименты, граница раздела сред.

Введение

В «Программе развития гражданской морской техники на 2009–2016 гг.» особое значение уделяется разработке и внедрению новых технологий при проектировании судов, и, в частности, судов с динамическими принципами поддержания – СПК, амфибийных и скеговых судов на воздушной подушке, экранопланов.

В гидродинамике быстроходных судов моделирование гидроаэродинамических процессов методами вычислительного эксперимента начинает приобретать практическое значение. Применительно к судам на воздушной подушке (СВП) выполнена серия работ [1–3], в которых показаны возможности технологий вычислительного эксперимента при выборе и отработке аэрогидродинамических компоновок СВП и их элементов.

Численное моделирование дает как полную, так и детальную картины течения, позволяет изучать условия работы движителей, рулевых устройств, в том числе при их взаимодействии между собой и корпусом. Однако очевидно, что технологии вычислительной гидромеханики могут быть в полной мере реализованы в проектировании только при условии согласования получаемых результатов с наиболее надежными экспериментальными и теоретическими данными, т. е. их предварительного тестирования.

В настоящей работе методология вычислительного эксперимента, базирующаяся на прямом решении осредненных уравнений Навье-Стокса турбулентного течения жидкости, применена для определения гидродинамических характеристик крыльевых устройств СПК. Учитывая, что в печатной и электронной литературе отсутствуют методические и расчетные материалы по определению гидродинамических характеристик КУ методами вычислительного эксперимента, в работе кратко приведена методика вычислительного эксперимента и его результаты применительно к НКУ СПК «Олимпия». Результаты вычислительных экспериментов сопоставлены с результата-

ми физических модельных экспериментов, проведенных в 1990 году в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова [4,5].

Вычислительные эксперименты осуществлялись с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Геометрическая и сеточная модели строились в пакете ANSYS ICEM. Валидация вычислительного эксперимента проводилась на режимах с различными погружениями НКУ, углами атаки и отклонения закрылка.

1. Математическая постановка задачи

При формулировке математической задачи принимаются следующие допущения:

1) жидкость весома и несжимаема;

2) реализуется турбулентный режим течения; для описания турбулентного характера течения справедливы осредненные уравнения движения несжимаемой вязкой жидкости и гипотеза вихревой вязкости;

3) границы НКУ есть абсолютно жесткие стенки, на которых выполняется условие непротекания и прилипания.

Течение жидкости в рамках этой модели, с учетом специфики численного решения в пакете ANSYS CFX, описывается следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных [6]

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho uw)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial x}+2\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{эф}\frac{\partial u}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\mu_{эф}(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}))+\\
&+\frac{\partial}{\partial z}(\mu_{эф}(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}))-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{эф}div\overline{V}),\\
&\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vv)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho vw)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial y}-\rho g+\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{эф}(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}))+2\frac{\partial}{\partial y}(\mu_{эф}\frac{\partial v}{\partial y})+\\
&+\frac{\partial}{\partial z}(\mu_{эф}(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}))-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial y}(\mu_{эф}div\overline{V}),\\
&\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uw)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vw)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho ww)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{эф}(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}))+\frac{\partial}{\partial y}(\mu_{эф}(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}))+\\
&+2\frac{\partial}{\partial z}(\mu_{эф}\frac{\partial w}{\partial z})-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial y}(\mu_{эф}div\overline{V});
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+div(\rho\overline{V})=0; \tag{2}$$

В уравнениях количества движения (1) и неразрывности (2), – u, v, w – компоненты вектора скорости $\overline{V}=u\overline{i}+v\overline{j}+w\overline{k}$, p – давление, ρ – плотность, $\mu_{эф}=\mu+\mu_{тур}$ – эффективная вязкость, складывающаяся из ламинарной (физической) вязкости μ и турбулентной (вихревой) вязкости $\mu_{тур}$.

Система уравнений (1), (2) решается в расчетной области, показанной на рис. 1. На этом же рисунке показана геометрия НКУ СПК «Олимпия».

Геометрические размеры крыльевого устройства приводятся в конструктивно-компоновочной схеме НКУ. Размах крыла составляет 13 метров, выходная граница расчетной области удалена от модели крыла примерно на 10 размахов, верхняя и нижняя на два размаха, входная, а также боковые границы удалены на 5 размахов крыла. Такой выбор дальних границ связан с необходимостью затухания возмущений вдали от НКУ. Затухание возмущений обеспечивает «надежное» выставление граничных условий на дальних границах расчетной области.

Решение системы уравнений количества движения и неразрывности реализовано при следующих начальных граничных и условиях.

В расчетной области в начальный момент времени скорости жидкости постоянны и равны скорости набегающего потока. Величина этой скорости в вычислительных

экспериментах задавалась равной 16,667 *м/с*, что обеспечивало равенство чисел Фруда в вычислительном и физическом буксировочном экспериментах. Начальное избыточное (по отношению к атмосферному) давление в жидкости задавалось гидростатическим в соответствии с заданным начальным «статическим» погружением НКУ.

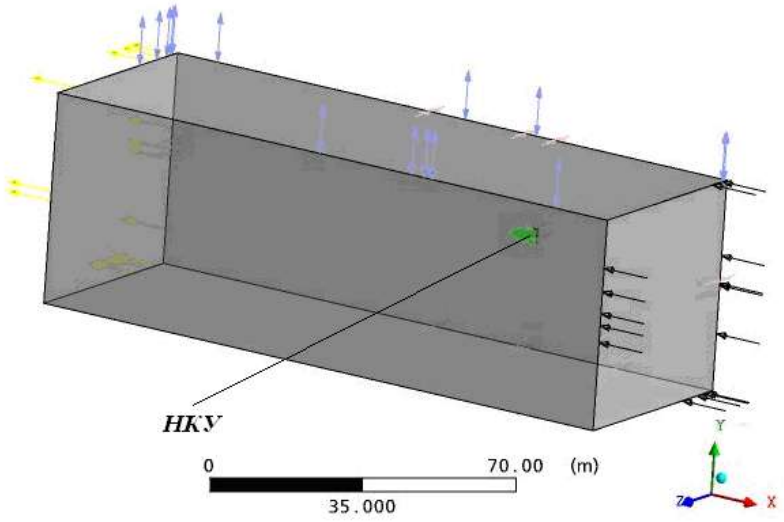


Рис. 1. Расчетная область задачи

На входной границе задается постоянная скорость набегающего потока, равная крейсерской скорости движения СПК *–16.667 м/с*. На выходе граничное условие задается через нормальную скорость потока, равную по величине скорости набегающего потока. Дно водоема моделируется как абсолютно жесткая стенка, так же как и модель НКУ СПК, на поверхностях которых выполняется условие непротекания и прилипания. Удаленные боковые границы – жесткие стенки, скользящие вдоль набегающего потока с его скоростью. На верхней границе задается нулевое избыточное давление с объемной фракцией воздуха, равной 1 и допускается вход-выход воздуха через эту границу. На границе раздела сред должны выполняться кинематическое и динамическое граничные условия, заключающиеся, соответственно, в непрерывности скоростей и напряжений при переходе через границу раздела сред. В численной реализации оба этих условия реализуются с помощью метода Харлоу (метода маркеров) [7].

Для замыкания системы (1)–(2) должна быть привлечена одна из моделей турбулентности, базирующаяся на гипотезе вихревой вязкости. При решении рассматриваемой задачи использовалась хорошо зарекомендовавшая себя во внешних задачах аэрогидродинамики СВП составная SST-модель турбулентности Ментера [8–11].

В процессе отработки методики вычислительного эксперимента проводились тестовые расчеты с различным числом узлов сеточной модели и различными законами расположения этих узлов вблизи НКУ.

2. Результаты моделирования

Ниже приведены результаты моделирования, полученные на сеточной модели с числом узлов около полутора миллионов. Узлы сгущались к модели крыла, а в пределах самой модели к торцевым кромкам крыла. На профиле крыла располагалось примерно 50 узлов.

На рис. 2 приведена типичная картина пространственного распределения давлений на поверхности НКУ.

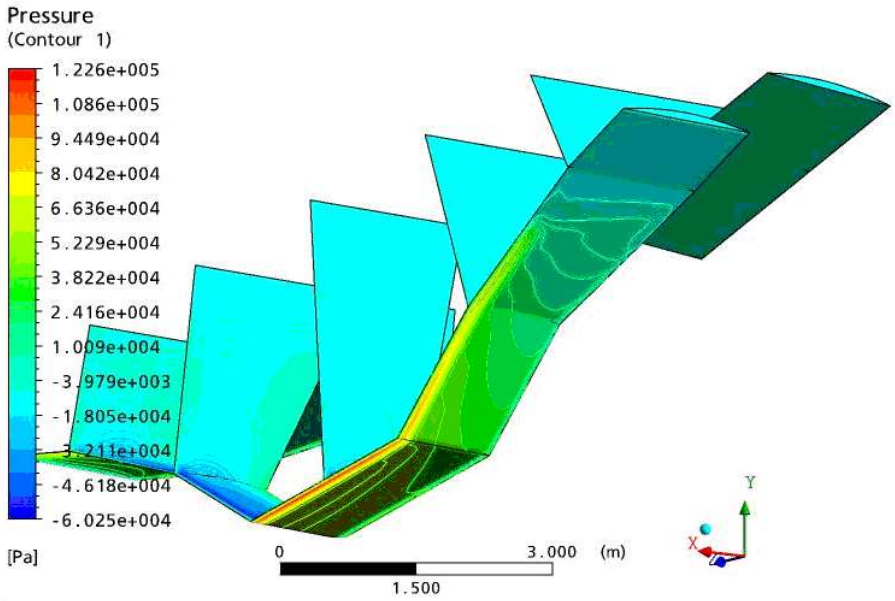


Рис. 2. Картина пространственного распределения давлений
на поверхности НКУ

Вблизи передней кромки в корневой части крыла реализуются достаточно большие избыточные положительные (нижняя часть крыла) и отрицательные (верхняя часть) давления, величины которых падают по мере удаления от корневой части к торцам. Величина разряжения в районе передней кромки в корневой части (см. рис. 3) указывает на близость начальной стадии кавитации для этой части крыла.

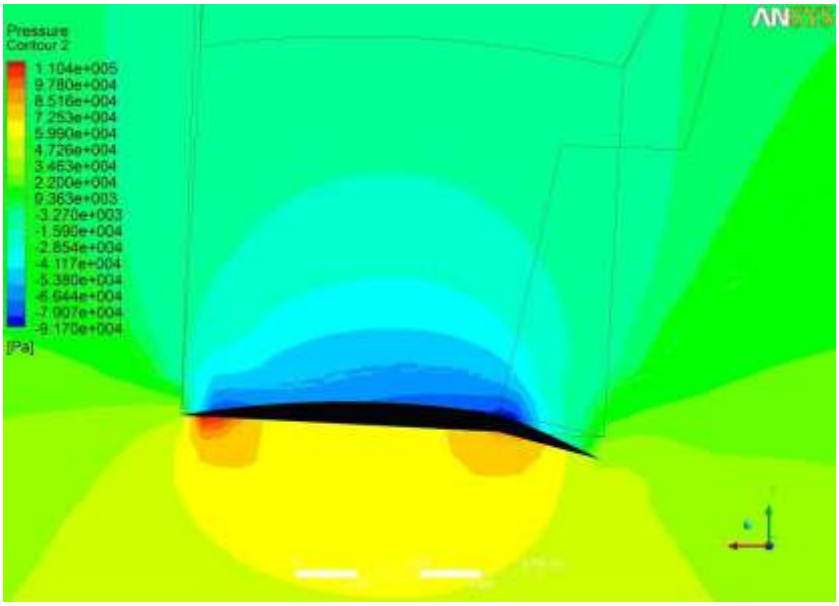


Рис. 3. Картина распределения давления
вблизи поверхности НКУ

Граница раздела воздуха и воды, а также линии тока показаны на рис. 4. Свободная поверхность характеризуется сформировавшейся впадиной за крылом и формирующимся в районе ее всплытия так называемым «петухом»; линии тока иллюстрируют образование вихревого следа за крыльевым устройством. Структура течения и вид свободной поверхности свидетельствуют о качественной непротиворечивости результатов, полученных в рамках использованной математической модели и построенных сеточных моделей, результатам физических экспериментов.

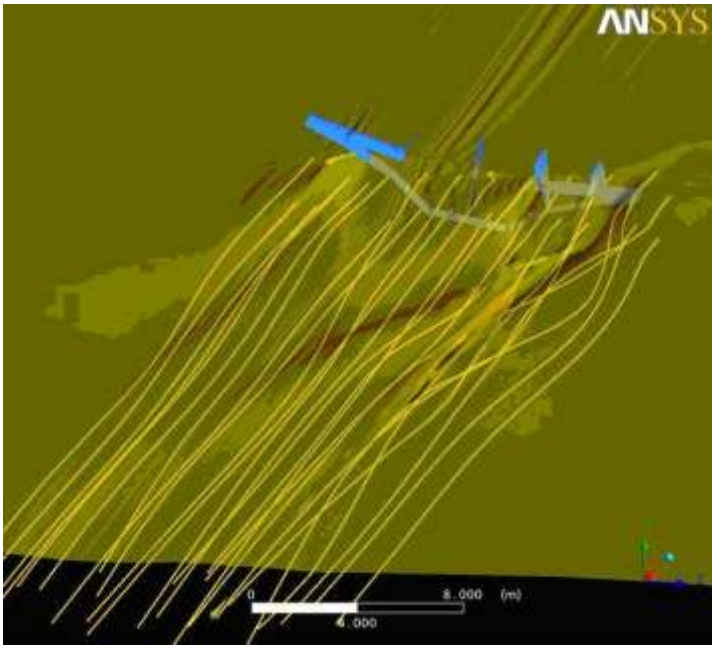


Рис. 4. Граница раздела сред и линии тока

Вычислительные эксперименты проводились в диапазоне заглублений h_H носового крыла 0,5 м ≤ h_H ≤ 2,15 м (крейсерский режим движения при штатной загрузке h_H =2 м) для двух различных значений дифферента (0 и 2 градуса – крейсерский дифферент). Установочный угол атаки крыльевого устройства равен 1°.

На рис. 5 сопоставлены результаты численного решения задачи с варьированием угла атаки, и результаты физических экспериментов в опытовом бассейне для величины погружения 2 метра.

На рис. 6 представлены результаты численного решения задач с варьированием угла перекладки центрального закрылка; на этом же рисунке приведены результаты экспериментального определения в опытовом бассейне влияния угла отклонения центрального закрылка на величину подъемной силы.

В целом, для начального этапа работ по применению технологий вычислительного эксперимента в гидродинамике подводных крыльев, полученные результаты вполне стыкуются с экспериментом. Это позволяет говорить о перспективе внедрения технологий вычислительного эксперимента в проектные задачи гидродинамики СПК.

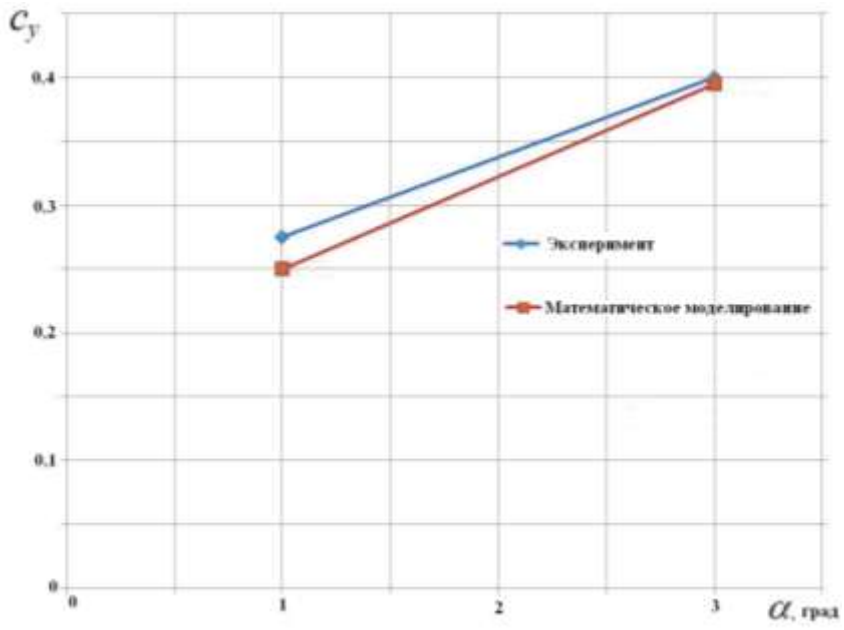


Рис. 5. Результаты решения задачи с варьированием угла атаки

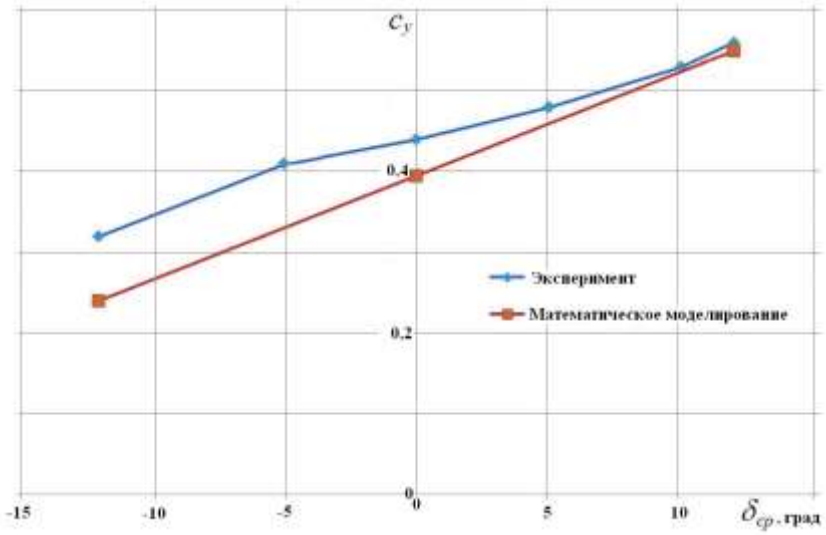


Рис. 6. Результаты решения задачи с варьированием угла перекладки центрального закрылка

3. Выводы

1. Разработана методика численного определения гидродинамических характеристик КУ СПК на базе решения осредненных уравнений Навье-Стокса турбулентного течения жидкости. Проведено исследование влияния общей структуры сетки и числа разбиения на результат.

2. Проведены расчеты коэффициента подъемной силы НКУ СПК «Олимпия» при варьировании погружения, угла атаки и угла отклонения центрального закрылка. Результаты вычислительных экспериментов сопоставлены с результатами физи-

ческих экспериментов. Проведенное сопоставление говорит об удовлетворительном для данного этапа исследований согласовании результатов вычислительных и физических экспериментов, что позволяет прогнозировать перспективность применения технологий вычислительного эксперимента в проектных задачах судов на подводных крыльях.

Список литературы

[1] Математическое моделирование несущего комплекса судов на воздушной подушке (СВП) / П.С. Кальясов., А.В. Туманин, В.В. Шабаров, А.К. Якимов // Морской вестник: сб.ст. – СПб. : Мор. вест., 2011. – №1. – С. 104–107.
[2] Численное исследование гибких ограждений амфибийных судов на воздушной подушке с учетом аэрогидроупругих эффектов / А.В. Туманин, П.С. Кальясов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского: сб. ст. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. №4, ч. 2. – С. 337–338.
[3] П.С. Кальясов, А.К. Любимов, В.В. Шабаров, А.К. Якимов. Развитие и применение методов вычислительного эксперимента для исследования несущего комплекса амфибийных судов на воздушной подушке. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2009. №6. С. 142–151
[4] Техническая записка «Определение гидродинамических характеристик подводных крыльев и разработка математической модели движения СПК «Олимпия» с САУД на нерегулярном волнении», Л.: Научно-технический кооператив «Корвет», 1990.
[5] Отработка гидродинамической компоновки морского пассажирского СПК «Олимпия» – научно-технический отдел ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, вып. № 32999, 1989
[6] Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А. И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.:Судостроение, 2005.
[7] David Cline, David Cardon, Parris K. Egbert, Fluid Flow for the Rest of Us: Tutorial of the Marker and Cell Method in Computer Graphics, Brigham Young University
[8] NASA Technical Report Server, http://www.nasa.gov/
[9] Rumsey C.L., Spalart P.R., Turbulence Model Behavior in Low Reynolds Number Regions of Aerodynamic Flow fields. NASA Center: Langley Research Center, 2008
[10] Menter F.R., Kuntz M., Langtry R., Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, Software Development Department, Germany
[11] ANSYS CFX Tutorial Reference. ANSYS Inc., 2006.

ASSESSMENT OF POSSIBILITIES OF COMPUTER APPLICATION EXPERIMENT TECHNOLOGY FOR DEFINITION OF HYDRO MECHANICAL CHARACTERISTICS OF UNDERWATER WINGS IN HYDROFOIL CRAFTS DESIGN

P.V. Konstantinov, V.V. Shabarov

Observations were made of computer application experiment for definition of hydro mechanical characteristics of hydrofoil separate wings system. Validation of computer experiment results with the results in the experimental model basin were made too. The subject of inquiry is forebody underwater wing of hydrofoil "Olympia". The research has been made with computer with computing experiment methods. The results of computer design and physical experiment are reconciled enough. The paper has 6 text pages, 6 figures and a list of science literature include 10 titles.

УДК 629.5:015.5

***М.В. Кудин**, аспирант, ННГУ им Н.И. Лобачевского,*
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.
***А.В. Ермолаев**, инженер-конструктор, ООО «СК АЭРОХОД»,*
603003, Нижний Новгород, ул. Щербакова, 37Е.

АНАЛИЗ ВИБРОНАГРУЖЕННОСТИ И СНИЖЕНИЕ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК В ТРАНСМИССИЯХ СВП

Проведено исследование вибронагруженности в трансмиссиях судов на воздушной подушке (СВП) с гибким ограждением баллонетного типа «Хивус». Показано, что несмотря на предварительную стендовую статическую и динамическую балансировки элементов трансмиссии, ее система в сборе оказывается динамически не отбалансированной. Установлены причины, приводящие к значительным виброперемещениям в системе трансмиссии СВП. Приведены сравнительные результаты по виброскоростям в элементах трансмиссии до и после финишной балансировки системы.

В процессе изготовления и эксплуатации деталей и узлов СВП возникают условия, нарушающие симметрию и приводящие к весовой несимметрии элементов трансмиссии. Эта несимметрия ведет к повышенным вибрациям в конструкции СВП, что не только снижает ресурс трансмиссии, но и сказывается на комфорте пассажиров и экипажа.

В основном, все вращающиеся детали СВП подвергаются статической (например, винт) и динамической (например, карданный вал) балансировкам в отдельности. Теоретически, при установке на судно, они не должны вызывать никаких повышенных вибраций. Однако на практике возникают ситуации, когда, казалось бы, уравновешенные детали вызывают значительные колебания в конструкциях движительно-рулевого комплекса (ДРК) СВП.

Для выяснения причин таких явлений были проведены работы, связанные с измерением вибраций на опорах подшипниковых узлов. Работы проводились на полной связанной системе трансмиссии при помощи виброметра-балансировщика «Протон-Баланс-2» [1,2]. Прибор имеет 2 входных канала. К одному подключается акселерометр, ко второму датчик оборотов. Прибор определяет уровни виброскоростей на частоте вращения исследуемого ротора и частоту вибрации.

Ниже, на рисунках 1–3, приведена схема трансмиссии СВП пр. А-8 «Хивус» и места где измерялись виброскорости на частоте вращения валов: нижний узел – частота вращения карданного вала от главного двигателя, верхний – частота вращения винта. Измерения проводились во всём диапазоне рабочих оборотов.

Замеры показали, что уровни виброскоростей на опорах подшипниковых узлов значительно превышают нормируемые уровни. В процессе измерений, значения амплитуд и частот вибраций являлись достаточно стабильными. Всё это позволило сделать вывод о том, что система, несмотря на предварительную элементную статическую и динамическую балансировки оказывается динамически не отбалансированной.

С помощью того же прибора была проведена динамическая балансировка двух узлов. Балансировка выполнялась в три этапа: измерение исходной вибрации и частоты, измерение вибрации с пробным грузом, расчет и установка балансировочных масс.

В результате проведённых работ удалось существенно снизить уровни виброскоростей. На рисунках 4, 5 приведены сравнительные характеристики вибронагруженности узлов до и после балансировки.

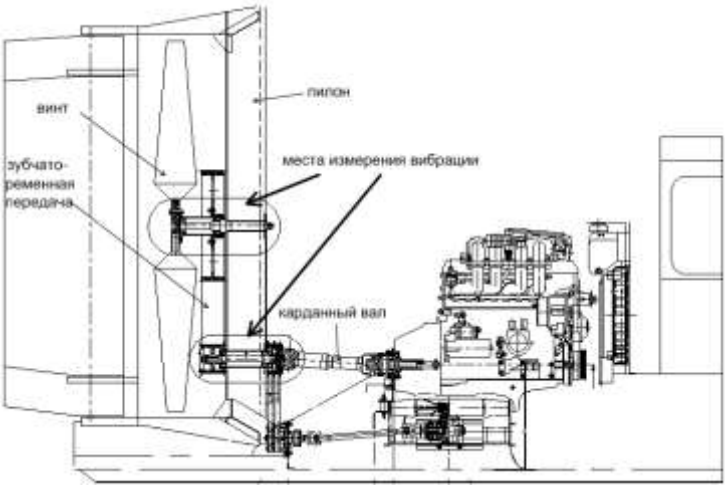


Рис. 1. Схема трансмиссии. Вид сбоку

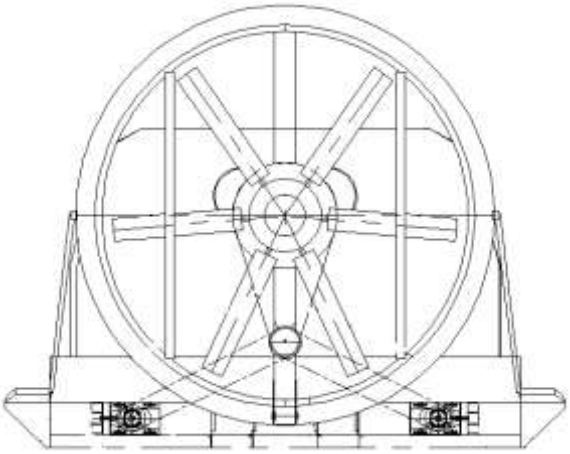


Рис. 2. Схема трансмиссии. Вид сзади

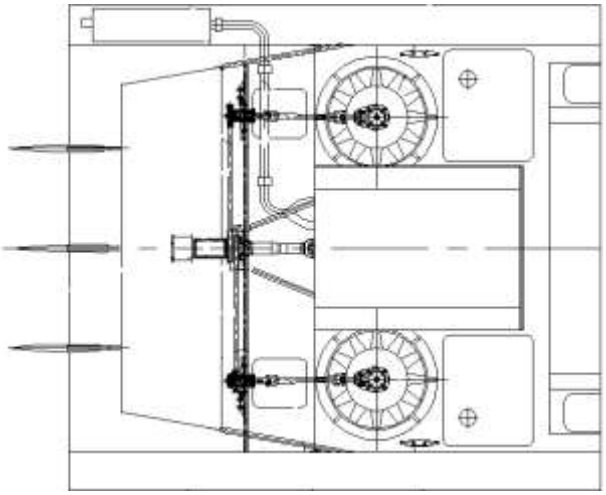


Рис. 3. Схема трансмиссии. Вид сверху

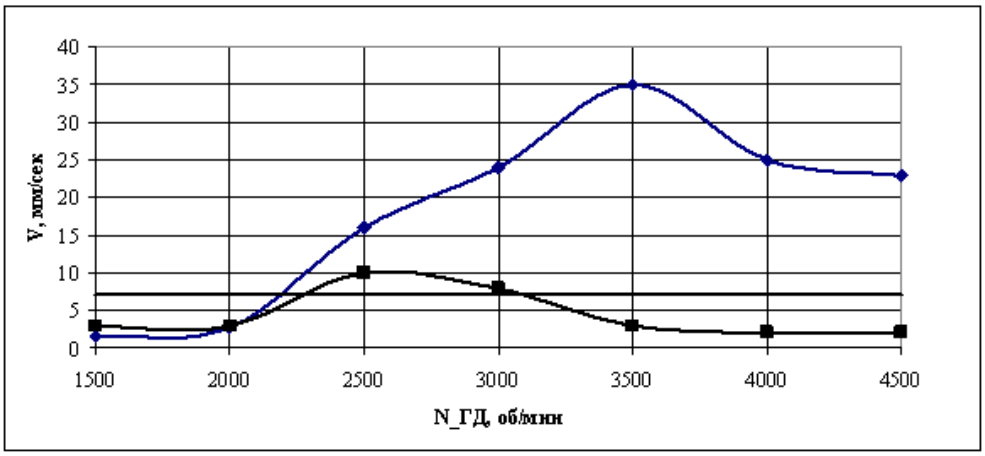


Рис. 4. Вибрации до (верхний график) и после балансировки верхнего узла на частоте вращения маршевого винта

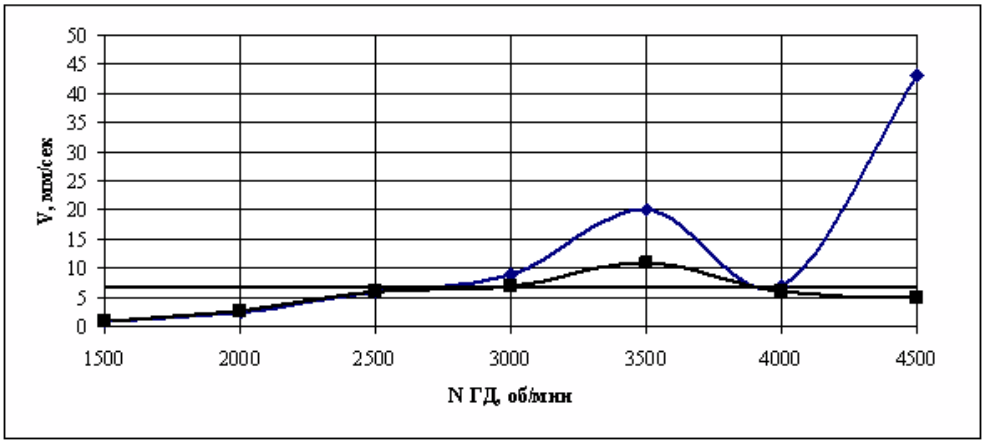


Рис. 5. Вибрации до (верхний график) и после балансировки нижнего узла на частоте вращения главного двигателя

Таким образом, отбалансированные по всем правилам ГОСТа [3] вращающиеся детали вызывают значительные вибрации в конструкции. Причины их возникновения представляются следующими:

– на определённых оборотах уровни виброскоростей резко возрастают, значит, собственные частоты конструкции попадают в рабочий диапазон возмущающих частот; при резонансе возможна сильная «раскачка» системы даже при незначительной возмущающей силе.

– каждая отбалансированная деталь всё равно имеет остаточный дисбаланс; при сборке трансмиссии в целом эти остаточные дисбалансы могут, как суммироваться, так и вычитаться.

– статически отбалансированный винт, оказывается динамически не отбалансированным из-за незначительных отклонений геометрических характеристик каждой лопасти.

Из-за сравнительно небольшой жёсткости ДРК, система оказывается весьма чувствительной даже к малейшим знакопеременным возмущениям. Поэтому польза финишной балансировки в трансмиссиях СВП очевидна. Финишная балансировка поз-

воляет добиться приемлемых значений виброскоростей в конструкции, увеличить комфорт и повысить надёжность подшипниковых узлов.

Список литературы

[1] Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т./Ред. В.Н. Челомей.-М.: Машиностроение, 1980 – Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов. 544 с, ил.
[2] URL: http://www.interbearing.com/index.php/balansirovka/protonbalans
[3] ГОСТ- ISO-10816

ANALYSIS OF VIBRO-LOADING AND REDUCTION OF ALTERNATING-SIGN LOAD IN TRANSMISSION OF HOVERCRAFT

M.V. Kudin, A.V. Ermolaev

In this article is presented an analysis of vibration loading in transmission of ACV "Hivus" with balloon type skirt. It is shown that in spite of preliminary static and dynamic bench balancing of transmission's individual elements, the ready-fitted system of the transmission stayed dynamically unbalanced. The reasons of significant vibration displacements in the transmission of ACV are specified. Results are demonstrated by comparison of vibration velocities in the ACV transmission before and after the final balancing.

УДК 629.543.018.4

Т. А. Кузнецова, *к.т.н., старший преподаватель, ВГАВТ.*
603600, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ КОНСТРУКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ТАНКЕРОВ ВНУТРЕННЕГО И СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ

Рассмотрена постановка численного эксперимента по определению энергоемкости бортовой защиты танкеров при столкновении. Выполнена обработка его результатов на основе методики планирования и статистической обработки многофакторного эксперимента и получена регрессионная зависимость для приближенного определения энергоемкости.

Для оценки экологической безопасности танкеров необходимо определение энергоемкости его конструктивной бортовой защиты (КБЗ) при столкновении. Точное определение энергоемкости КБЗ является весьма сложной задачей. Поэтому представляет интерес разработка приближенной зависимости на основе численного эксперимента и дисперсионно-регрессионного анализа.

Для вывода регрессионной зависимости для расчета энергоемкости конструктивной бортовой защиты танкеров на основе дисперсионно-регрессионного анализа в работе использовалась методика планирования и статистической обработки многофакторного эксперимента, изложенная в работах Пряничникова К.Н. [1, 2].

При постановке численного эксперимента определялась энергоемкость КБЗ с использованием программы для ЭВМ «Tanker», алгоритм которой приведен в [3]. За исходные данные принимались значения факторов, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Уровни и значения факторов

№ п/п	Название факторов	Уровни					
		1	2	3	4	5	6
1	Ширина поперечной рамной шпации A, м	1,65	2,17	2,68	3,2	-	-
2	Высота бортовой защиты h, м	2,2	3,3	4,4	5,5	-	-
3	Толщина настила палубы (кроме палубного стрингера) $t_п$, мм	6	8	10	12	-	-
4	Толщина обшивки борта $t_б$, мм	6	7	8	9	-	-
5	Площадь поперечного сечения РЖ палубы $f_п \cdot 10^4$, см^2	11,13	16,54	21,95	27,36	-	-
6	Площадь поперечного сечения РЖ борта $f_б \cdot 10^4$, см^2	11,13	14,81	18,48	22,16	-	-
7	Толщина продольной переборки $t_{пп}$, мм	6	6,33	6,67	7	-	-
8	Предельный момент сопротивления рамного шпангоута борта $W_б \cdot 10^4$, см^3	2,42	3,96	5,51	7,05	-	-
9	Предельный момент сопротивления рамного шпангоута 2-го борта $W_{2б} \cdot 10^4$, см^3	1,50	4,63	7,77	10,90	-	-
10	Количество шпангоутов в отсеке $n_ш$	2	6	10	14	-	-
11	Предельный момент сопротивления рамного бимса тронка $W_т \cdot 10^4$, см^3	3,78	5,43	7,07	8,72	-	-
12	Число РЖ в межбортовом отсеке, n	0	1	2	3	-	-
13	Высота тронка $h_т$, м	0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5

С целью уменьшения количества факторов для всех вариантов судов принималось, что:

1. ширина продольной шпации равна 550 мм;
2. судно имеет двойные борта и продольную систему набора;
3. ребра жесткости на втором борту и на стенке тронка не учитываются;
4. увеличение толщины ширстрека и палубного стрингера не учитываются, так как в [3] показано, что изменение их толщины мало влияет на энергоемкость;
5. угол наклона форштевня 30º, угол наклона тронка и верхней части второго борта при наличии тронка 30 º;
6. высота наклонной верхней части второго борта выбирается из условия, что объем танка при наличии тронка будет таким же, как при палубе без тронка.

При расчете высоты наклонной верхней части второго борта использовались главные размерения и размеры танков судов, подобранных в предыдущей части исследования [4]. Наименьшая высота наклонной части второго борта при заданной высоте тронка получается у судна, имеющего меньшую ширину танка. При этом судно должно иметь также достаточную высоту танка. С ошибкой в безопасную сторону принимается для судов с большими размерами высота наклонной части второго борта такой, как для меньших судов. Размеры слома второго борта при заданной высоте тронка для первого этапа эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2

Размеры слома второго борта при заданной высоте тронка

Высота тронка, м	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
Высота наклонной части второго борта, м	1,55	2,02	2,80	4,04	4,35
Ширина потопчины над наклонной частью, м	0,90	1,17	1,62	2,33	2,52

Расчет регрессионных коэффициентов выполнялся с помощью программы для ЭВМ, разработанной студентом Вахутиным П.Г. [5] на основе алгоритма, изложенного в работе Пряничникова К.Н. [6]. Данная программа позволяет выполнить расчет регрессионных коэффициентов при числе факторов не более шести. Поэтому факторы, приведенные в таблице 1, были разделены на четыре группы с целью выявления наиболее значимых, и дальнейшего уменьшения числа факторов. Таким образом, численный эксперимент на первом этапе состоял из четырех отдельных расчетов. Уровни и значения факторов, формирующих матрицу плана для каждой части эксперимента приведены в таблицах 3–6.

Таблица 3

Уровни и значения факторов первой части эксперимента

Название факторов	Уровни			
	1	2	3	4
Ширина поперечной рамной шпации А, м	1,65	2,17	2,68	3,2
Высота бортовой защиты h, м	2,2	3,3	4,4	5,5
Площадь поперечного сечения РЖ палубы fп·104, см^2	11,13	16,54	21,95	27,36

Таблица 4

Уровни и значения факторов второй части эксперимента

Название факторов	Уровни			
	1	2	3	4
Толщина настила палубы (кроме палубного стрингера) $t_п$, мм	6	8	10	12
Толщина обшивки борта $t_б$, мм	6	7	8	9
Площадь поперечного сечения РЖ борта $f_б \cdot 10^4$, см^2	11,13	14,81	18,48	22,16

Таблица 5

Уровни и значения факторов третьей части эксперимента

Название факторов	Уровни			
	1	2	3	4
Предельный момент сопротивления рамного шпангоута борта $W_б \cdot 10^4$, см^3	2,42	3,96	5,51	7,05
Предельный момент сопротивления рамного шпангоута 2-го борта $W_{2б} \cdot 10^4$, см^3	1,50	4,63	7,77	10,90
Количество шпангоутов в отсеке $n_ш$	2	6	10	14

Таблица 6

Уровни и значения факторов четвертой части эксперимента

Название факторов	Уровни			
	1	2	3	4
Толщина продольной переборки $t_{пп}$, мм	6	6,33	6,67	7
Предельный момент сопротивления рамного бимса тронка $W_т \cdot 10^4$, см^3	3,78	5,43	7,07	8,72
Число РЖ в межбортовом отсеке, *n*	0	1	2	3

Каждый из факторов, формирующих матрицу плана эксперимента, варьировался на четырех уровнях. Наиболее значимый фактор – высота тронка, варьировался на

шести уровнях. План каждой из четырех частей расчета и результаты опытов, полученные расчетом по программе «Tanker», приведены в таблицах 7–10.

Таблица 7

План первой части эксперимента. Результаты опытов

№ п/п	A, м	h, м	$f_п \cdot 10^4$, см^2	Высота тронка $h_т$, м					
				0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
				Номера опытов					
1	1,65	2,2	11,13	393	1002	1214	1561	2207	2651
2	2,17	4,4	27,36	609	1177	1438	1852	2713	3314
3	2,68	5,5	16,54	728	1254	1506	1921	2750	3459
4	3,2	3,3	21,95	950	1568	1855	2269	3045	3722
5	2,17	3,3	16,54	610	1164	1406	1800	2528	3078
6	1,65	5,5	21,95	358	924	1157	1579	2534	3142
7	3,2	4,4	11,13	873	1413	1677	2096	2876	3594
8	2,68	2,2	27,36	851	1484	1754	2120	2821	3400
9	2,68	4,4	21,95	760	1333	1602	2020	2844	3525
10	3,2	2,2	16,54	976	1575	1840	2214	2893	3521
11	1,65	3,3	27,36	388	1027	1274	1680	2508	3023
12	2,17	5,5	11,13	562	1046	1273	1680	2506	3139
13	3,2	5,5	27,36	913	1518	1811	2244	3159	3912
14	2,68	3,3	11,13	760	1305	1554	1950	2640	3269
15	2,17	2,2	21,95	553	1252	1493	1842	2498	2989
16	1,65	4,4	16,54	357	928	1162	1587	2482	3057

Таблица 8

План второй части эксперимента. Результаты опытов

№ п/п	$t_п$, мм	$t_б$, мм	$f_б \cdot 10^4$, см^2	Высота тронка $h_т$, м					
				0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
				Номера опытов					
1	6	6	11,13	367	908	1110	1439	2058	2526
2	8	8	22,16	475	1123	1368	1787	2587	3154
3	10	9	14,81	519	1192	1443	1874	2479	3269
4	12	7	18,48	515	1183	1425	1838	2609	3167
5	8	7	14,81	428	1031	1255	1630	2338	2855
6	6	9	18,48	443	1074	1318	1734	2534	3098
7	12	8	11,13	539	1207	1447	1859	2626	3182
8	10	6	22,16	464	1096	1327	1717	2447	2980
9	10	8	18,48	510	1173	1419	1840	2636	3204
10	12	6	14,81	494	1129	1354	1735	2437	2959
11	6	7	22,16	419	1019	1248	1632	2368	2897
12	8	9	11,13	473	1108	1347	1753	2525	3078
13	12	9	22,16	570	1293	1561	2028	2912	3530
14	10	7	11,13	463	1082	1306	1683	2386	2905
15	8	6	18,48	418	1011	1230	1595	2282	2789
16	6	8	14,81	423	1021	1249	1632	2364	2892

Таблица 9

План третьей части эксперимента. Результаты опытов

№ п/п	$W_б \cdot 10^4$, см^3	$W_{2б} \cdot 10^4$, см^3	$n_ш$	Высота тронка $h_т$, м					
				0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
				Номера опытов					
1	2,42	1,50	2	601	1190	1376	1830	1775	1833
2	3,96	7,77	14	474	1205	1463	1887	2641	2850
3	5,51	10,90	6	510	1338	1639	2153	3106	3631
4	7,05	4,63	10	426	1140	1404	1845	2640	3173
5	3,96	4,63	6	474	1194	1465	1931	2819	3368
6	2,42	10,90	10	446	1098	1327	1704	1481	2584
7	7,05	7,77	2	426	1192	1408	1686	1868	1922
8	5,51	1,50	14	614	1254	1531	2339	2842	3427
9	5,51	7,77	10	510	1320	1608	2089	2947	3186
10	7,05	1,50	6	518	1098	1355	2125	2609	3202
11	2,42	4,63	14	446	1057	1273	1623	2251	2704
12	3,96	10,90	2	501	1298	1502	1747	1928	1981
13	7,05	10,90	14	426	1180	1453	1906	2711	2936
14	5,51	4,63	2	526	1308	1512	1767	1950	2005
15	3,96	1,50	10	569	1139	1386	2121	2554	3104
16	2,42	7,77	6	446	1122	1375	1814	2652	2886

Таблица 10

План четвертой части эксперимента. Результаты опытов

№ п/п	$t_{пп}$, мм	$W_т \cdot 10^4$, см^3	n	Высота тронка $h_т$, м					
				0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
				Номера опытов					
1	6	3,78	0	236	727	919	1247	1893	2325
2	6,33	7,07	3	1129	1998	2301	2815	3755	4349
3	6,67	8,72	1	461	1082	1313	1706	2452	3053
4	7	5,43	2	763	1508	1777	2232	3077	3645
5	6,33	5,43	1	460	1078	1308	1699	2444	2962
6	6	8,72	2	760	1497	1763	2213	3054	3686
7	7	7,07	0	240	737	934	1266	1916	2439
8	6,67	3,78	3	1138	2001	2306	2821	3763	4280
9	6,67	7,07	2	762	1504	1772	2226	3070	3674
10	7	3,78	1	463	1085	1318	1712	2459	2941
11	6	5,43	3	1136	1994	2297	2808	3747	4298
12	6,33	8,72	0	237	731	924	1254	1900	2453
13	7	8,72	3	1140	2005	2311	2827	3770	4416
14	6,67	5,43	0	239	734	929	1260	1908	2385
15	6,33	3,78	2	761	1501	1768	2220	3062	3584
16	6	7,07	1	459	1075	1304	1693	2436	2987

Расчет регрессионных коэффициентов для каждой части эксперимента выполнялся с помощью программы для ЭВМ [5, 6].

Анализируя полученные значения дисперсии контраста для каждого фактора, можно сделать вывод, что наименьшее влияние имеют факторы: высота бортовой защиты, площадь поперечного сечения ребер жесткости палубы, площадь поперечного сечения ребер жесткости борта, толщина продольной переборки, предельный момент сопротивления рамного шпангоута борта, предельный момент сопротивления рамного шпангоута второго борта, предельный момент сопротивления рамного бимса тронка.

Для оставшихся шести факторов был проведен второй этап эксперимента. Уровни и значения факторов приведены в таблице 11, размеры слома второго борта при заданной высоте тронка приведены в таблице 12, план эксперимента и результаты опытов – в таблице 13.

Таблица 11

Уровни и значения факторов

Название факторов	Уровни								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ширина поперечной рамной шпации A, м	1,64	1,9	2,16	2,42	2,68	2,94	3,2	-	-
Толщина настила палубы (кроме палубного стрингера) $t_п$, мм	6	7	8	9	10	11	12	-	-
Толщина обшивки борта $t_б$, мм	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	-	-
Количество шпангоутов в отсеке $n_ш$	2	4	6	8	10	12	14	-	-
Число РЖ в межбортовом отсеке, n	0	1	2	3	4	5	6	-	-
Высота тронка $h_т$, м	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6

Таблица 12

Размеры слома второго борта при заданной высоте тронка

Высота тронка, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Высота наклонной части второго борта, м	1,31	1,74	2,02	2,69	2,90	4,04	4,26	4,45
Ширина потопчины над наклонной частью, м	0,76	1,0	1,17	1,56	1,68	2,33	2,46	2,57

Таблица 13

План эксперимента. Результаты опытов

	A	$t_п$	$t_б$	$n_ш$	n	Высота тронка $h_т$, м								
						0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
						Номера опытов								
1	1,64	6	6	2	0	128	506	641	736	921	988	1145	1165	1325
2	1,9	8	7,5	10	5	1956	2791	3079	3291	3777	3952	4824	5267	5344
3	2,16	10	9	4	3	1668	2427	2679	2854	3147	3247	3450	3501	3705
4	2,42	12	7	12	1	796	1263	1455	1634	1958	2092	2707	3212	3279
5	2,68	7	8,5	6	6	3281	4133	4457	4712	5110	5238	5646	5559	5801
6	2,94	9	6,5	14	4	2062	2616	2854	3051	3428	3593	4256	4860	4936
7	3,2	11	8	8	2	1482	2028	2273	2482	2896	3057	3804	4465	4551
8	1,9	7	6,5	4	1	384	914	1124	1293	1640	1755	2174	2250	2445
9	2,16	9	8	12	6	2816	3523	3820	4040	4531	4710	5598	6161	6285
10	2,42	11	6	6	4	1987	2643	2915	3151	3615	3770	4389	4513	4768
11	2,68	6	7,5	14	2	1006	1475	1660	1837	2159	2288	2879	3389	3457
12	2,94	8	9	8	0	554	960	1141	1304	1615	1760	2347	2925	2997
13	3,2	10	7	2	5	2897	3172	3281	3396	3571	3651	3939	4012	4384

	A	$t_п$	$t_б$	$n_ш$	n	Высота тронка $h_т$, м								
						0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
						Номера опытов								
14	1,64	12	8,5	10	3	1120	1870	2136	2328	2786	2952	3832	4011	4426
15	2,16	8	7	6	2	912	1426	1653	1833	2237	2392	3152	3302	3669
16	2,42	10	8,5	14	0	463	857	1024	1187	1483	1607	2181	2660	2724
17	2,68	12	6,5	8	5	2701	3371	3650	3896	4362	4543	5414	6087	6199
18	2,94	7	8	2	3	1909	2383	2528	2620	2746	2820	3027	3092	3415
19	3,2	9	6	10	1	921	1372	1569	1744	2077	2211	2796	3359	3417
20	1,64	11	7,5	4	6	2047	2243	2294	2341	2416	2455	2582	2611	2765
21	1,9	6	9	12	4	1494	2250	2509	2705	3148	3310	4135	4620	4742
22	2,42	9	7,5	8	3	1455	2029	2262	2472	2876	3035	3814	3999	4492
23	2,68	11	9	2	1	987	1670	1938	2145	2482	2606	2936	3014	3328
24	2,94	6	7	10	6	2767	3380	3642	3855	4281	4463	5222	5868	5967
25	3,2	8	8,5	4	4	2499	3278	3639	3901	4376	4538	5076	5133	5448
26	1,64	10	6,5	12	2	641	1214	1412	1559	1897	2023	2665	3044	3135
27	1,9	12	8	6	0	252	694	867	1005	1330	1462	2147	2315	2714
28	2,16	7	6	14	5	1964	2534	2766	2944	3329	3473	4159	4627	4716
29	2,68	10	8	10	4	2111	2726	2978	3205	3632	3798	4596	5225	5327
30	2,94	12	6	4	2	1407	1986	2254	2477	2923	3119	3856	4014	4481
31	3,2	7	7,5	12	0	557	952	1125	1284	1589	1714	2256	2789	2843
32	1,64	9	9	6	5	2331	3007	3152	3197	3126	3163	3273	3297	3439
33	1,9	11	7	14	3	1142	1811	2038	2207	2583	2724	3413	3853	3943
34	2,16	6	8,5	8	1	562	982	1166	1318	1652	1783	2439	2907	3001
35	2,42	8	6,5	2	6	2005	2204	2270	2354	2461	2518	2705	2762	3019
36	2,94	11	8,5	12	5	2883	3536	3823	4053	4509	4703	5517	6212	6313
37	3,2	6	6,5	6	3	1509	2036	2267	2463	2865	3021	3748	4382	4474
38	1,64	8	8	14	1	356	848	1026	1163	1474	1592	2189	2548	2634
39	1,9	10	6	8	6	2501	3399	3652	3813	4117	4183	4327	4369	4533
40	2,16	12	7,5	2	4	1856	2062	2144	2219	2342	2403	2610	2673	2912
41	2,42	7	9	10	2	1012	1518	1721	1909	2266	2409	3100	3627	3718
42	2,68	9	7	4	0	489	885	1059	1235	1568	1708	2407	2583	3109
43	3,2	12	9	14	6	3732	4427	4736	4984	5487	5674	6550	7271	7374
44	1,64	7	7	8	4	1374	2183	2467	2677	3060	3179	3541	3561	3696
45	1,9	9	8,5	2	2	911	1439	1557	1614	1704	1751	1901	1945	2137
46	2,16	11	6,5	10	0	393	751	915	1049	1335	1451	1992	2420	2483
47	2,42	6	8	4	5	2599	3079	3193	3267	3354	3404	3553	3596	3812
48	2,68	8	6	12	3	1425	1930	2130	2318	2656	2792	3414	3946	4017
49	2,94	10	7,5	6	1	926	1406	1623	1811	2177	2343	3036	3681	3771

Далее был выполнен расчет регрессионных коэффициентов с помощью программы для ЭВМ [5, 6], по результатам которого составлена регрессионная зависимость.

Свободный член $b_0 = BO / D1 = 38{,}945 / 0{,}0138 = 2822{,}1$,

где BO – свободный член уравнения регрессии, $D1$ – декодирующий модуль.

Вклад фактора A:

$$\left[2{,}426\xi_1(A) - 0{,}209\xi_4(A) + 0{,}189\xi_5(A)\right] / D1;$$

вклад фактора $t_п$:

$$[0{,}786\xi_1(t_{\text{п}})+0{,}161\xi_2(t_{\text{п}})+0{,}160\xi_5(t_{\text{п}})]/D1;$$

вклад фактора $t_{\text{б}}$:

$$[0{,}892\xi_1(t_{\text{б}})+0{,}327\xi_2(t_{\text{б}})-0{,}704\xi_3(t_{\text{б}})-0{,}137\xi_4(t_{\text{б}})-0{,}148\xi_5(t_{\text{б}})]/D1;$$

вклад фактора $n_{\text{ш}}$:

$$[1{,}205\xi_1(n_{\text{ш}})-0{,}559\xi_2(n_{\text{ш}})+0{,}823\xi_3(n_{\text{ш}})]/D1;$$

вклад фактора n:

$$[6{,}041\xi_1(n)-0{,}545\xi_3(n)]/D1;$$

вклад фактора $h_{\text{т}}$:

$$[4{,}092\xi_1(h_{\text{т}})-0{,}076\xi_4(h_{\text{т}})]/D1;$$

вклад взаимодействия факторов $A\times h_{\text{т}}$:

$$[0{,}237\xi_1(A)\xi_1(h_{\text{т}})-0{,}046\xi_4(A)\xi_1(h_{\text{т}})]/D1;$$

вклад взаимодействия факторов $n_{\text{ш}} \times h_{\text{т}}$:

$$[0{,}422\xi_1(n_{\text{ш}})\xi_1(h_{\text{т}})-0{,}136\xi_2(A)\xi_1(h_{\text{т}})]/D1;$$

вклад взаимодействия факторов $n \times h_{\text{т}}$:

$$[-0{,}058\xi_2(n)\xi_1(h_{\text{т}})]/D1.$$

Для определения энергоемкости КБЗ в [т·м] необходимо просуммировать приведенные составляющие, подставляя значения коэффициентов ортогональных полиномов ξ_i (i – номер контраста) для соответствующих уровней факторов, приведенные в [2].

Например, значение энергоемкости КБЗ при значениях факторов A=3,2 м (7 уровень), $t_{\text{п}}$=9 мм (4 уровень), $t_{\text{б}}$=6 мм (1 уровень), $n_{\text{ш}}$=10 (5 уровень), n=1 (2 уровень), $h_{\text{т}}$=0,6 м (4 уровень) согласно расчету по программе «Tanker» составляет 1744 т·м=17109 кДж.

Вычислим энергоемкость U по приведенным зависимостям.

$$\begin{aligned}U=&[2{,}426\cdot 3-0{,}209\cdot 3+0{,}189\cdot 1]/D1+[0{,}786\cdot 0+0{,}161\cdot(-4)+0{,}160\cdot 0]/D1+\\&+[0{,}892\cdot(-3)+0{,}327\cdot 5-0{,}704\cdot(-1)-0{,}137\cdot 3-0{,}148\cdot(-1)]/D1+\\&+[1{,}205\cdot 1-0{,}559\cdot(-3)+0{,}823\cdot(-1)]/D+[6{,}041\cdot(-2)-0{,}545\cdot 1]/D1+\\&+[4{,}092\cdot(-1)-0{,}076\cdot 9]/D+[0{,}237\cdot 3\cdot(-1)-0{,}046\cdot 3\cdot(-1)]/D1+\\&+[0{,}422\cdot 1\cdot(-1)-0{,}136\cdot 5\cdot(-1)]/D1+[-0{,}058\cdot 0\cdot(-1)]/D=2093\,\text{т}\cdot\text{м}.\end{aligned}$$

Расхождение с точным значением 20%.

Среднеквадратичная ошибка эксперимента по данным машинного расчета составляет ±367 т·м.

Таким образом, по результатам работы получена приближенная зависимость для определения энергоемкости конструктивной бортовой защиты (КБЗ) танкеров внутреннего и смешанного плавания на основе численного эксперимента и дисперсионно-регрессионного анализа, удовлетворительно предсказывающая результат со среднеквадратичной ошибкой ±367 т·м для 93% выборки.

Список литературы

[1] Пряничников К.Н. Волновые нагрузки: дисс…. канд. техн. наук: 05.08.02 / Пряничников Константин Николаевич. – Горький, 1983. – 167 с.

[2] Пряничников К.Н. Планирование и статистическая обработка многофакторного эксперимента. Отчет о госбюджетной научно-исследовательской работе / К.Н. Пряничников // Машинописный отчет. – Н. Новгород, 1991. – 56 с.
[3] Кузнецова Т.А. Обоснование конструкции корпуса танкеров внутреннего и смешанного плавания для повышения их безопасности при столкновении: дисс…. канд. техн. наук: 05.08.03: защищена 24.06.08: утв. 26.09.08 / Кузнецова Татьяна Александровна. – Н. Новгород, 2008. – 245 с.
[4] Кузнецова Т.А. Обоснование нормирования энергоемкости конструктивной защиты танкеров внутреннего и смешанного плавания. Отчет по этапу 1 ГБ НИР / Т. А. Кузнецова // Машинописный отчет. – Н. Новгород, 2010. – 14 с.
[5] Вахутин П.Г. Конкурсная работа по теме «Оптимальное конструирование предварительно напряженных железобетонных балок» / П.Г. Вахутин, В.Е. Ефремов // Машинописный отчет. – Н. Новгород, 2004. – 48 с.
[6] Пряничников, К. Н. Многоуровневое планирование эксперимента при определении внешних сил, действующих на мост катамарана на волнении / К. Н. Пряничников // Тезисы докладов на II научно-технической конференции «Совершенствование эксплуатации и ремонта корпусов судов». – Калининград, 1981. – с. 377–379.

APPROXIMATE CALCULATION OF THE STRUCTURE PROTECTION'S ENERGY CAPACITY FOR RIVER AND RIVER-SEA TYPE TANKERS IN CASE OF THE COLLISION

T.A. Kuznetsova

Statement of numerical experiment on the calculation of the structure protection's energy capacity for tankers in case of the collision is considered. Processing of its results on the basis of a technique of planning and statistical processing of multiple-factor experiment is executed and formula for the approximate calculation of energy capacity is received.

УДК 629.12:539.4

И.И. Трянин, *д.т.н., профессор ФБОУ ВПО «ВГАВТ».*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО ВЕЛИЧИНУ РАСЧЕТНОГО ВОЛНОВОГО МОМЕНТА ПО ЕГО ОБЕСПЕЧЕННОСТИ

В задачах определения волнового изгибающего момента корпуса судна вероятностно-статистическим методом с использованием полновероятностной схемы разрешающее уравнение не имеет точного аналитического решения. В статье рассматривается простой приближенный метод его решения, удобный для реализации на ЭВМ

В вероятностно-статистическом методе расчетный волновой момент $M_р$ находится при заданной его обеспеченности $Q(M_р)$ как корень трансцендентного уравнения

$$Q(M_p) = \int_0^{h_{\max}} p(h_{3\%}) \exp\left[-\frac{M_p^2}{2D_M}\right] dh_{3\%}, \qquad (1)$$

где h_{max} – максимальное значение высоты волны трехпроцентной обеспеченности $h_{3\%}$ для района плавания судна ;

$p(h_{3\%})$ – плотность вероятности встречи судна с режимом волнения, характеризуемом величиной $h_{3\%}$; ;
D_M – дисперсия изгибающего момента для рассматриваемого режима волнения.

Здесь мы не рассматриваем определение функций $p(h_{3\%})$ и $D_M(h_{3\%})$, стоящих под интегралом (1); считаем их известными.

Равенство (1) позволяет вычислить обеспеченность заданного расчётного момента, но нам надо решить обратную задачу – по известной обеспеченности Q найти расчётный момент M_p. Аппроксимируем равенство (1) с помощью закона Вейбулла:

$$Q(M_p) = \exp\left[-\frac{M_p}{a_M}\right]^k. \tag{2}$$

Эту формулу можно переписать так

$$M_p = a_M\left[-\ln Q(M_p)\right]^{1/k}. \tag{3}$$

Для нахождения двух неизвестных k и a_M по формуле (1) вычислим две обеспеченности Q_1 и Q_2 для двух значений расчетного момента $M_p=M_1$ и $M_p=M_2$. Получим систему из двух уравнений:

$$a_M(-\ln Q_1)^{1/k} = M_1; \quad a_M(-\ln Q_2)^{1/k} = M_2. \tag{4}$$

Отсюда

$$(\ln Q_1 / \ln Q_2)^{1/k} = M_1 / M_2. \tag{5}$$

Еще раз прологарифмируем и найдем

$$k = \frac{\ln\left(\dfrac{\ln Q_1)}{\ln(Q_2)}\right)}{\ln\left(\dfrac{M_1}{M_2}\right)}; \quad a_M = \frac{M_1}{(-\ln Q_1)^{1/k}}. \tag{6}$$

Равенства (3) и (6) позволяют найти расчётный момент по способу последовательных приближений. Но для этого надо знать, как назначать моменты M_1 и M_2 .

По теореме о среднем интегрального исчисления из равенства (1) получим

$$Q(M_p) = p(\xi)\exp\left[-\frac{M_p^2}{2D_M(\xi)}\right](h_{\max} - h_{\min}); \quad h_{\min} \le \xi \le h_{\max}. \tag{7}$$

Отсюда можно получить

$$M_p = \sqrt{-2D_M(\xi)y_Q(\xi)}, \tag{8}$$

где $y(\xi) = \ln\left[\dfrac{Q(M_p)}{p(\xi)(h_{\max} - h_{\min})}\right]$.

Так как точное значение ξ нам неизвестно, то под корнем равенства (8) возьмем среднее на интервале ($h_{\min}$, $h_{\max}$) значение; в результате получим приближенное равенство

$$M_p \approx \sqrt{[-2D_M(h_{3\%})y_Q(h_{3\%})]_{\text{ср}}}. \quad (9)$$

Момент, вычисленный по формуле (9), примем за начальное значение расчетного момента; обозначим его через M_{p0}. Положив $M_1 = M_{p0}$, $M_2 = 1{,}1M_1$, по формулам (3) и (6) вычислим значение расчетного момента в первом приближении M_{p1}, а по формуле (1) – его обеспеченность $Q(M_{p1})$. Если $Q(M_{p1})$ отличается от нормативного значения $Q(M_p)$ не более, чем на 0,1%, то процесс последовательных приближений приостанавливается. В противном случае надо положить $M_1 = M_{p1}$, выполнить второе приближение и т.д. до тех пор, пока требуемая точность не будет достигнута.

Описанный способ решения уравнения (1) был применен при составлении программы расчёта на ЭВМ волнового изгибающего момента на миделе корпуса судна без учёта вибрации корпуса (с учётом только качки) и с учётом её. Опыт вычислений показал, что процесс последовательных приближений сходится очень быстро; достаточно 2–3 приближений, чтобы требуемая точность была достигнута.

SOLUTION OF EQUATION DETERMINING THE MAGNITUDE OF DESIGN WAVE MOMENT BASED ON ITS PROBABILITY OF OCCURRENCE

I. Tryanin

The task of determining the bending wave moment of the hull of a ship by using probabilistic and statistical approach together with full probability method does not have an exact analytical solution for the solving equation. A simple approximation method of solving the equation is presented in the article, the method being convenient for computer calculations.

УДК 629.12.001

М.Э. Францев, *канд. техн. наук, АО «Нептун-Судомонтаж».*
gepard629@yandex.ru

ПРОЕКТНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АМФИБИЙНЫХ КАТЕРОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ ДЛЯ КРУГЛОГОДИЧНЫХ И СЕЗОННЫХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

В статье изложены принципы проектного анализа эксплуатационных и экономических аспектов использования амфибийных катеров на воздушной подушке для круглогодичных и сезонных пассажирских перевозок. Рассмотрены интегральные параметры, учитывающие характеристики полной массы, мощности и скорости АКВП. Выполнен сравнительный анализ интегральных параметров и приведен пример расчета себестоимости перевозок.

В условиях рыночной экономики одной из главных задач в проектировании судов становится повышение конкурентоспособности проекта судна. Это требование может быть реализовано за счет следующих мероприятий:

– обеспечения судну при проектировании повышенных, по сравнению с судами – претендентами, потребительских качеств без пропорционального повышения строительной стоимости судна и стоимости его эксплуатации;

– повышения качества проектных работ, особенно на ранних стадиях проектирования;

– уменьшения издержек на многовариантные проработки и сокращения общих сроков выработки проекта.

Одной из важнейших задач разработки проекта нового судна является блок эксплуатационных и экономических аспектов его применения. Экономическая и эксплуатационная эффективность судна в большой степени обеспечивается за счет применения при создании судна передовых проектных решений.

На территории России существует достаточно большое количество мест, где эффективно применение для круглогодичных и сезонных перевозок амфибийных катеров на воздушной подушке (АКВП). В качестве наиболее известных пассажирских транспортных маршрутов, на которых используются АКВП, можно привести такие линии, как Благовещенск – Хэйхэ (КНР), Салехард – Лабытнанги, Нижний Новгород – Бор, Самара – Рождествено и ряд других.

В то же время, массовое применение АКВП для пассажирских перевозок сдерживается отсутствием новых эффективных проектов судов этого типа. Важной проблемой проектирования пассажирских АКВП является отсутствие отработанных методик для выполнения эксплуатационных и экономических расчетов эффективности судов данного типа на предполагаемых линиях. Ниже приведена методика проектного анализа эксплуатационных и экономических аспектов использования амфибийных катеров на воздушной подушке для круглогодичных и сезонных пассажирских перевозок.

Проблема выбора критерия эффективности судна, как элемента некоторой экономической системы, исследовалась в работах В.М. Пашина, А.В. Бронникова, И.Г. Захарова и ряда других авторов. Академик В.М. Пашин указывает, что проектирование судна и его оптимизация становятся невозможными в отрыве от систем более высокого уровня, являющихся для отдельно взятого судна своеобразной внешней средой. Поэтому проектант самостоятельно либо с помощью заказчика обосновывает целесообразность создания данного конкретного судна либо комплекса совместно работающих судов и определяет или уточняет исходные характеристики для непосредственной разработки проекта. [3]

Основой критерия выбора служат экономические показатели, определяющие доходную и расходную части эксплуатационных характеристик судна.

К группе экономических показателей, определяющих доход от эксплуатации пассажирского АКВП, обязательно должно быть отнесено количество перевезенных пассажиров, а при предполагаемом использовании АКВП еще и в качестве разъездного судна – дополнительно количество выполненных рейсов.

Экономические параметры, определяющие расходы на эксплуатацию – в виде общей суммы затрат на эксплуатацию и установленных законом отчислений оплачиваемых судовладельцем:

– расходы на топливо;

– расходы на экипаж;

– налоги и сборы, зависящие от характеристик (вместимость, мощность, длина) судна;

– отчисления, зависящие от строительной стоимости судна.

– Экономическая эффективность гражданских АКВП оценивается по следующим критериям:

– критерий общей эффективности;

– критерий сравнительной экономической эффективности.

Критерием общей эффективности является отношение годовой прибыли к капитальным вложениям (в современной терминологии – инвестициям):

$$s = \frac{P_э - S}{K} \quad (1)$$

где $P_э$ – экономический эффект в виде годового объема выполняемой судном работы под которым понимается годовой доход от эксплуатации судна;

S — эксплуатационные расходы;

K — капитальные вложения (инвестиции).

Еще одним критерием общей эффективности может являться срок окупаемости капитальных вложений, или, используя современную терминологию, инвестиционная привлекательность:

$$t = \frac{K}{P_э - S} \quad (2)$$

Критерием сравнительной экономической эффективности является абсолютная величина совокупных затрат в виде:

$$S_c = S + E_{норм} K \quad (3)$$

где $E_{норм}$ – кредитный процент или при бюджетном финансировании нормативный коэффициент капитальных вложений;

Для транспортных судов критерий сравнительной экономической эффективности может быть представлен в виде относительных приведенных затрат:

$$S_П = S / Q + E_{норм}(K / Q) \quad (4)$$

где Q – провозная способность в денежном выражении [1].

В соответствии с принципами, предложенными в работе [3], устанавливаются, так называемые зоны рационального использования АКВП. Потребность в АКВП определяется на основе совместного рассмотрения всех направлений перевозок. В качестве критерия служат суммарные приведенные затраты, которые минимизируются при условии:

– выполнения объемов перевозок по всем направлениям;

– обязательного использования всех существующих судов.

Задача проектного обоснования экономических характеристик АКВП включает следующие этапы:

1. Определение района плавания, ветро-волнового режима, режима ледостава, торошения, сроков светлого времени, сроков навигации и предельных ограничений.
2. Определение и обоснование типа и режима (режимов) движения АКВП (плавание – полет, степень аэростатической разгрузки) путем анализа характеристик района плавания и судов-претендентов по определенной схеме при определенных критериях.
3. Определение граничных условий для главных размерений и других характеристик судна.
4. Расчет укрупненной нагрузки масс судна.
5. Расчет характеристик энерговооруженности, мощности и скорости.
6. Определение технологических аспектов постройки, расчет укрупненной строительной стоимости судна и конкурентных ограничений.
7. Расчет укрупненных эксплуатационных расходов.
8. Расчет приведенных затрат.
9. Расчет характеристик судна, определяющих доходную составляющую.
10. Расчет минимального уровня рентабельности эксплуатации судна.

11. Определение критериев оптимизации.
12. Решение задачи уточнения характеристик судна.

В соответствии с принципами, изложенными в работе [3] разработана математическая модель задачи уточнения характеристик АКВП для пассажирских перевозок:

$$\sum_{j\in J}\sum_{s\in S} c_j(z_s)x_{js} + \\ + \begin{cases} (E_н + e)[\sum_{s\in S} k(z_s)\varphi(\sum_{j\in J} x_{js}, z_s)\sum_{j\in J} x_{js}] \\ (E_н + e)[\sum_{s\in S} k(z_s)\sum_{j\in J} x_{js} + \sum_{s\in S} r(z_s)\omega_s] \end{cases} \to \min \tag{5}$$

$$\sum_{s\in S} a_i(z_s)x_{js} \ge A_j \quad \forall j \in J \tag{6}$$

$$\sum_{j\in J}\ \sum_{s\in S} l_i(x_s)x_{js} \ge B \tag{7}$$

$$\left.\begin{matrix} \sum_{s\in S} k(z_s)\varphi(\sum_{j\in J} x_{js}, z_s)\sum_{j\in J} x_{js} \\ \sum_{s\in S} k(z_s)\sum_{j\in J} x_{js} + \sum_{s\in S} r(z_s)\omega_s \end{matrix}\right\} \le K \tag{8}$$

$$z_s \ge z_{\min} - z_s \le z_{\max} \quad \forall s \in S \tag{9}$$

$$\sum_{j\in J} x_{js} y_s \le x_s^k \quad \forall k \in K \tag{10}$$

$$y_s = \begin{cases} 1 & z_s \in \{z_{\min}^k\ z_{\max}^k\} \\ 0 & z_s \in \{z_{\min}^k\ z_{\max}^k\} \end{cases} \tag{11}$$

$$x_{js} \ge 0 \quad \forall j \in J\ s \in S \tag{12}$$

где x_{js} – количество АКВП с характеристиками z_s для j – линии;
$c_i(x_{js})$ – годовые эксплуатационные расходы одного АКВП с характеристиками z_s на j –линии, исключая расходы, зависящие от стоимости судна;
$k(z_s)$ – стоимость одного серийного АКВП с характеристиками z_s
$\varphi(\sum_{j\in J} x_{js}, z_s)$ – функция серийности;
$r_s=r(z_s)$ – затраты на подготовку производства и освоение серийной постройки АКВП;
A_i – годовой пассажиропоток на линии;
$a_i(z_s)$ – годовая провозная способность судна с характеристиками на линии рассчитываемая с учетом реальных особенностей данной линии;
$l_i(z_s)$ – годовой доход на одно АКВП с учетом суточных колебаний загрузки;
B – контрольный уровень дохода по всем линиям;
K – объем инвестиций
$\{z_{\min}\ z_{\max}\}$ – общий диапазон допустимых характеристик АКВП;
$\{z_{\min}^k\ z_{\max}^k\}$ – k-диапазон допустимых характеристик АКВП, при которых допусти-

мое число судов ограничено сверху;

$k \in K$ – множество диапазонов;

x_s^k – ограничение допустимого числа АКВП с характеристиками z_s принадлежащими k-диапазону;

$E_н$ – нормативный коэффициент эффективности инвестиций;

e – коэффициент учета эксплуатационных расходов, зависящих от стоимости судна.

В рамках проектного анализа эксплуатационных и экономических аспектов амфибийных катеров на воздушной подушке должны быть рассмотрены следующие вопросы:

– предложены и обоснованы типы пассажирских АКВП, рассматриваемые в качестве судов – претендентов для выполнения маршрутных перевозок, включая их компоновочные аспекты;

– обоснованы технические качества АКВП, рассматриваемых в качестве судов – претендентов, в виде их главных размерений, полной массы, характеристик энерговооруженности, мощности и вместимости;

– обоснован выбор амфибийных качеств АКВП, рассматриваемых в качестве судов – претендентов, включая конструкцию гибкого ограждения воздушной подушки (ГО) и характеристики управляемости, исходя из навигационных условий предполагаемого района эксплуатации;

– обоснован выбор по степени предпочтительности характеристик мощности, скорости и вместимости АКВП, рассматриваемых в качестве судов – претендентов, с точки зрения экономической эффективности пассажирских перевозок;

– выполнен сравнительный анализ различных вариантов конструкции АКВП, рассматриваемых в качестве судов – претендентов, отличающихся характеристиками мощности, скорости и вместимости, а также амфибийными качествами по критерию экономической эффективности и выбран оптимальный вариант;

– обоснованы эксплуатационные качества АКВП, рассматриваемых в качестве судов – претендентов, в виде характеристик ходкости, маневренности и мореходности, а также их расходных характеристик, при этом определено потребное количество судов для организации пассажирских перевозок на рассматриваемых линиях;

– обоснованы технологические и экономические вопросы постройки АКВП, рассматриваемых в качестве судов – претендентов, определена строительная стоимость головного судна, а также всех судов установочной серии;

– обоснованы маневренные характеристики АКВП, рассматриваемых в качестве судов – претендентов, и рассмотрено их взаимодействие с плавучими причальными сооружениями при посадке и высадке пассажиров для варианта эксплуатации при наличии открытой воды и невозможности выхода на берег;

– выполнены расчеты провозной способности АКВП, рассматриваемых в качестве судов – претендентов и обоснование их экономической эффективности на предполагаемых линиях;

– получены другие эксплуатационные и экономические показатели работы АКВП, рассматриваемых в качестве судов – претендентов, вплоть до структуры эксплуатационных расходов, а также цен билетов на различных линиях, определяющей порог окупаемости и цен билетов для льготных категорий пассажиров.

Рис. 1. Рассматриваемые типы АКВП

В рамках обоснования типа АКВП целесообразно выполнять сравнительный анализ их интегрированных расходных характеристик, включающих удельный расход топлива главных двигателей, их мощность, полную массу судна, его скорость и характеристики его полезной нагрузки.

Ниже, в качестве примера, приведены элементы сравнительного анализа АКВП с двухъярусным гибким ограждением и АКВП с надувными скегами.

В качестве судов-претендентов рассматривались АКВП следующих проектов:

– АКВП с двухъярусным гибким ограждением пр.18800 «Гепард»;
– АКВП с двухъярусным гибким ограждением пр.18802 «Пума»;
– АКВП с двухъярусным гибким ограждением «Арго»;
– АКВП с двухъярусным гибким ограждением «Леопард»;
– АКВП с надувными скегами «Хивус-6»;
– АКВП с надувными скегами «Хивус-10».

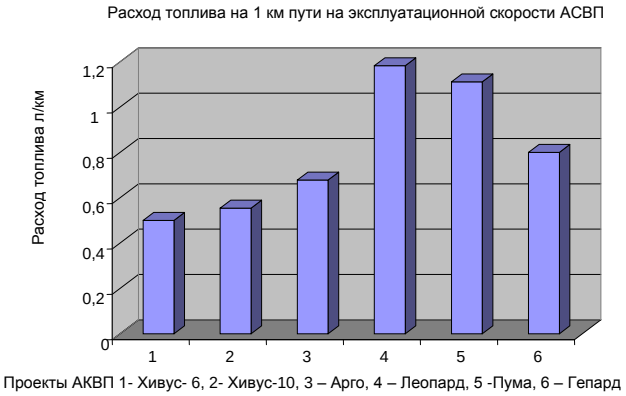


Рис. 2. Расход топлива АКВП на 1 км пути

Рис. 3. Расход топлива АКВП на перевозку 1 т полной массы на 1 км пути

Первичными контролируемыми параметрами при экономическом анализе стали:

– расход топлива на 1 км пути (см. рис. 2);

– расход топлива на перемещение 1 пассажира на 1 км пути (см. рис. 4);

– расход топлива на перемещение 1 т полной массы на 1 км пути (см. рис. 3).

Произведен расчет различных экономических характеристик эксплуатации рассматриваемых АКВП по 27 пассажирским линиям. При этом учитывались расходы на топливо, оплату персонала, амортизацию катеров, а также на ремонт различных элементов катеров, в том числе, на ремонт ГО воздушной подушки. В результате расчета получен ряд зависимостей. [2, 4] На рис. 5 приведены результаты расчета для АКВП «Хивус-10» в графической форме.

Рис. 4. Расход топлива АКВП на перевозку 1 пассажира на 1 км пути

Результаты расчета в аналитической форме представлены в виде формулы:

$$C = 6{,}6396L^{0{,}8446}$$

где C – себестоимость перевозки одного пассажира, руб.;

L – протяженность линии, км.

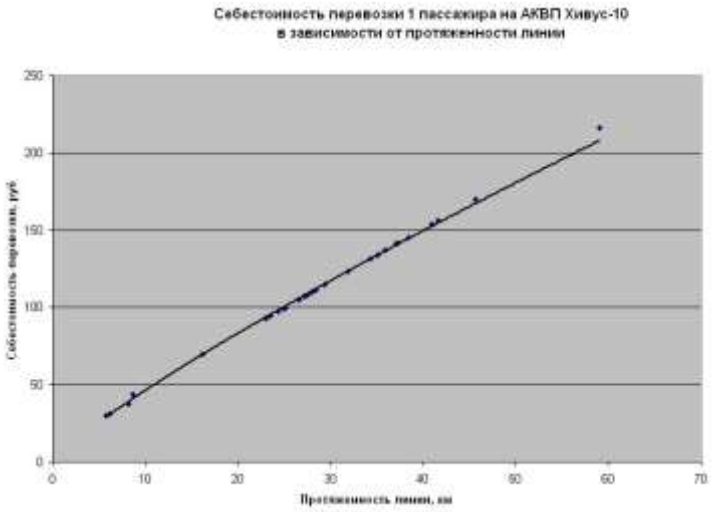


Рис. 5. Изменение себестоимости перевозки одного пассажира АКВП «Хивус-10» в зависимости от протяженности линии

Таким образом, реализация модели оптимизации АКВП при проектировании позволяет обеспечить заданные эксплуатационные качества судна, а также конкурентоспособность проекта и рентабельность судостроительного производства. Модель оптимизации при проектировании АКВП наряду с выбором критериев эффективности, определением областей допустимых значений, определяемых налагаемыми проектными ограничениями, в обязательном порядке должна содержать, также, эксплуатационные и экономические показатели, обосновывающие выбор проектных характеристик.

Список литературы:

[1] Ашик В.В. Проектирование судов. Л., Судостроение, 1985, – 486 с.
[2] Лоран П.-Ж. Аппроксимация и оптимизация. – М.: Мир, 1975. – 498 с.
[3] Пашин В.М. Оптимизация судов. Л., Судостроение, 1983, – 286 с.
[4] Суворов А.И. Информационная технология экспериментальных и научных исследований в судостроении. Проблемные разработки программного обеспечения новой информационной технологии: Сб. науч. тр. – Калинин, 1990, Вып. 3. – С. 118–126.

THE DESIGN ANALYSIS OF OPERATIONAL AND ECONOMIC ASPECTS OF USE OF AMFIBIYNY BOATS ON AN AIRBAG FOR ALL-THE-YEAR-ROUND AND SEASONAL PASSENGER TRAFFIC

M.E. Frantsev

In article principles of the design analysis of operational and economic aspects of use of amfibiyny boats on an airbag for all-the-year-round and seasonal passenger traffic are stated. The integrated parameters considering characteristics of full weight, capacity and speed of AKVP are considered. The comparative analysis of integrated parameters is made and given an example calculation of cost of transportations.

УДК 629.122/123:004.72

***А.М. Фролов**, к.т.н., доцент, ФБОУ ВПО «ВГАВТ»*
***А.В Иванов**, к.т.н. доцент, ФБОУ ВПО «ВГАВТ»*
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5А.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО БРУСА СУДОВ С ДВОЙНЫМ ДНОМ

Рассматриваются вопросы проектирования эквивалентного бруса судов с двойным дном и двойными бортами на начальных стадиях проектирования. Статья посвящена двум наиболее распространенным типам судов, а именно сухогрузным судам бункерного типа и нефтеналивным танкерам. В первом приближении эквивалентный брус представляется в виде двух поясков площадь, которых зависит о соотношения допускаемых напряжений при общем изгибе, размеров связей полученных из условий местной прочности и требований правил речного регистра, а также фактических соотношений полученных на основании статистической обработки существующих судов.

Технико-экономические показатели и надёжность судов существенно зависят от стандарта общей продольной прочности их корпусов. Поэтому, при проектировании судов самое серьёзное внимание уделяется выбору размеров продольных связей, входящих в состав эквивалентного бруса. Оптимальные размеры связей целесообразно назначать на основе сравнительного анализа вариантов возможных конструктивных решений. Для этого целесообразно иметь аналитический аппарат, позволяющий быстро и с достаточной точностью выполнять проектировочный расчёт элементов эквивалентного бруса.

В настоящее время для обеспечения экологической безопасности все грузовые (и сухогрузные и наливные) суда проектируются, как правило, с двойным дном и двойными бортами. Данная статья посвящена проектированию эквивалентного бруса двух наиболее распространённых типов грузовых судов:

– сухогрузное судно бункерного типа (рис. 1);

– нефтеналивной танкер (рис. 2).

Для выполнения проектировочного расчёта эквивалентного бруса необходимо знать величины расчётных изгибающих моментов M_p при перегибе ($+M_p$) и прогибе ($-M_p$).

Требуемый минимальный момент сопротивления при перегибе (прогибе)

$$W_{\min} \geq \frac{|M_{\text{р}}|}{(\sigma_{\text{доп}})_2}, \tag{1}$$

требуемый максимальный момент сопротивления при перегибе (прогибе)

$$W_{\max} \geq \frac{|M_{\text{р}}|}{(\sigma_{\text{доп}})_1}, \tag{2}$$

где $(\sigma_{\text{доп}})_2$ – допускаемые нормальные напряжения для верхней кромки эквивалентного бруса;

$(\sigma_{\text{доп}})_1$ – допускаемые нормальные напряжения для нижней кромки эквивалентного бруса.

В Правилах Российского Речного Регистра [1,2] нормируемые значения допускаемых напряжений даются в долях от опасных напряжений.

Опасные нормальные напряжения $\sigma_{\text{о}}$ принимаются равными:

$$\sigma_{\text{о}} = k_{\text{и}} R_{eH} \tag{3}$$

где R_{eH} – предел текучести материала, МПа;
$k_{\text{и}} \leq 1$ – коэффициент использования материала.

При этом

$$\left.\begin{aligned} & k_{\text{и}} = 1 - 0{,}089\left(\frac{R_{eH}}{235} - 1\right) - 0{,}129\left(\frac{R_{eH}}{235} - 1\right)^2 \\ & 235\text{МПа} \leq R_{eH} \leq 390\text{МПа} \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

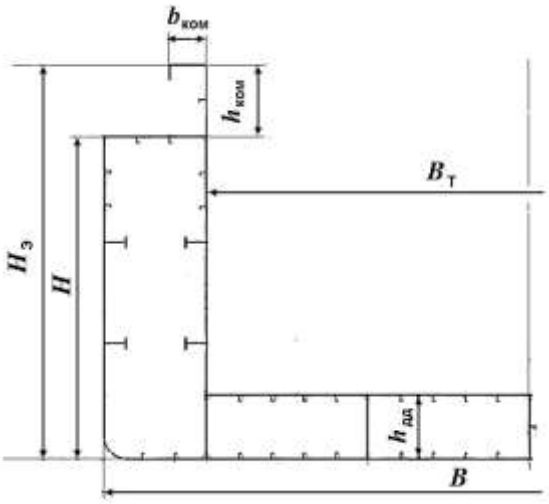


Рис. 1. Схема эквивалентного бруса судна бункерного типа

Значения опасных и допускаемых нормальных напряжений судостроительных сталей при общем изгибе судна приведены в табл. 1

Таблица 1

Опасные и допускаемые нормальные напряжения судостроительных сталей при общем изгибе судна

R_{eH}, МПа		235	315	355	390
$k_{\text{и}}$		1	0,96	0,92	0,89
$\sigma_{\text{о}}$, МПа		235	300	325	345
$(\sigma_{\text{доп}})_1$. МПа		141	180	195	207
$(\sigma_{\text{доп}})_2$, МПа	Кл. «М-СП», «М-ПР», «М»	165	210	228	242
	Кл. «О-ПР», «О». «Р», «Л»	176	225	244	259

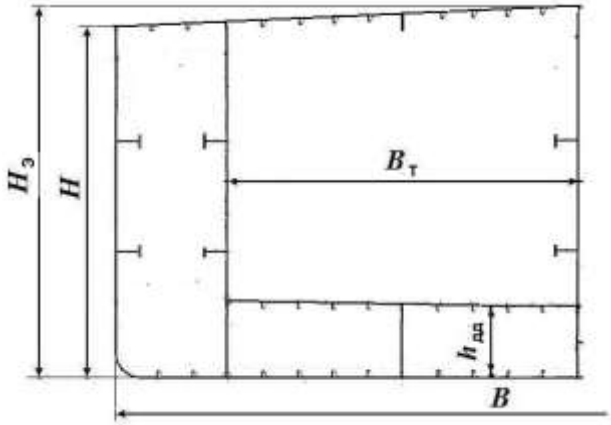


Рис. 2. Схема эквивалентного бруса нефтеналивного танкера

Требуемый центральный момент инерции эквивалентного бруса

$$I \geq W_{\min}(1-\varepsilon)H_э. \tag{5}$$

где $H_э$ – высота эквивалентного бруса, определяемая по следующим формулам:

– для бункерного судна с вертикальными внутренними бортами

$$H_э = H + \frac{B - B_т}{50} + h_{ком}, \tag{6}$$

– для нефтеналивного танкера

$$H_э = H + \frac{B}{50} \tag{7}$$

H – высота борта;
B – ширина судна расчётная;
$B_т$ – ширина грузового трюма;
$h_{ком}$ – высота комингса:
$\varepsilon = \frac{z_1}{H_э} = \frac{1}{1+n}$ – отношение расстояния нейтральной оси от днища z_1 к высоте эквивалентного бруса;
$n = \frac{(\sigma_{доп})_2}{(\sigma_{доп})_1}$ – отношение допускаемых нормальных напряжений для верхней кромки эквивалентного бруса к допускаемым нормальным напряжениям для нижней кромки эквивалентного бруса.

Будем, с некоторым запасом в безопасную сторону, считать, что в состав эквивалентного бруса входят только продольные связи палубного и днищевого поясов и продольные связи второго дна (рис. 3 и рис. 4). Роль связей бортов и внутренних бортов, набранных по поперечной системе, при проверке общей прочности судна по нормальным напряжениям пренебрежимо мала [3]. Поэтому, их влиянием, с некоторым запасом, можно пренебречь.

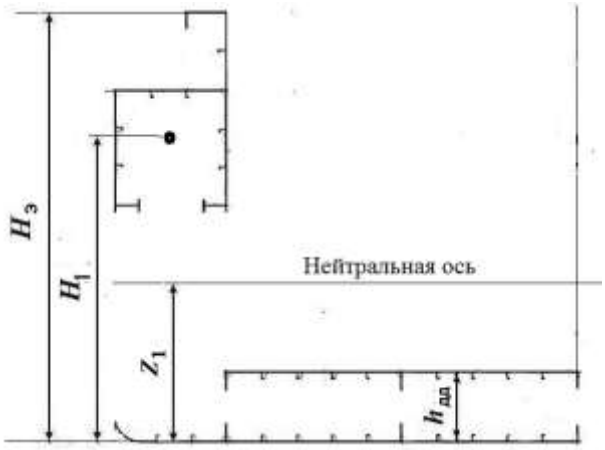


Рис. 3. Расчётная схема эквивалентного бруса судна бункерного типа

Тогда главный центральный момент инерции эквивалентного бруса (относительно нейтральной оси) можно определить по приближённой формуле

$$I = 2S(H_1 - \varepsilon H_э)^2 + 2S_1(\varepsilon H_э)^2 + 2S_2(\varepsilon H_э - h_{дд})^2. \quad (8)$$

где S – приведённая площадь поперечного сечения верхнего (палубного) пояска эквивалентного бруса (для половины сечения);

S_1 – приведённая площадь поперечного сечения нижнего (днищевого) пояска эквивалентного бруса(для половины сечения);

S_2 – приведённая площадь поперечного сечения продольных связей второго дна (для половины сечения);

H_1 – расстояние центра тяжести поперечного сечения палубного пояска от основной плоскости.

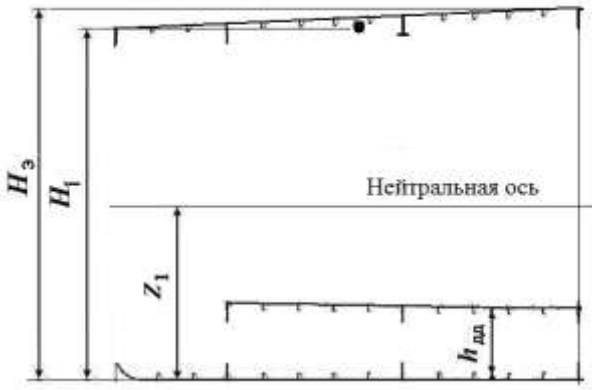


Рис. 4. Расчётная схема эквивалентного бруса нефтеналивного танкера

Моменты сопротивления для крайних связей эквивалентного бруса можно выразить следующими формулами:

$$W_{\min} = \frac{I}{(1-\varepsilon)H_э} = 2S\frac{(H_1 - \varepsilon H_э)^2}{(1-\varepsilon)H_э} + 2S_1\frac{(\varepsilon H_э)^2}{(1-\varepsilon)H_э} + 2S_2\frac{(\varepsilon H_э - h_{дд})^2}{(1-\varepsilon)H_э} \quad (9)$$

$$W_{\max} = \frac{I}{\varepsilon H_э} = 2S\frac{(H_1 - \varepsilon H_э)^2}{\varepsilon H_э} + 2S_1\frac{(\varepsilon H_э)^2}{\varepsilon H_э} + 2S_2\frac{(\varepsilon H_э - h_{дд})^2}{\varepsilon H_э} \qquad (10)$$

Приведённая площадь поперечного сечения продольных связей второго дна определяется условиями местной прочности, устойчивости и эксплуатационных перегрузок. Поэтому, в рассматриваемой задаче она может считаться заданной.

На основании формулы (9) может быть записано одно из уравнений для определения приведённых площадей S и S_1:

$$(\frac{H_1}{H_э} - \varepsilon)^2 S + \varepsilon^2 S_1 = \frac{W_{\min}}{2H_э}(1-\varepsilon) - (\varepsilon - \eta)^2 S_2, \qquad (11)$$

в котором величина η равна

$$\eta = \frac{h_{дд}}{H_э}, \qquad (12)$$

где $h_{ДД}$ – высота двойного дна.

Второе уравнение для определения приведённых площадей S и S_1 при заданном значении S_2 получим из условия равенства нулю статического момента эквивалентного бруса относительно нейтральной оси:

$$S\ (H_1 - \varepsilon H_э) - S_1 \varepsilon H_э - S_2(\varepsilon H_э - h_{дд}) = 0 \qquad (13)$$

или

$$(\frac{H_1}{H_э} - \varepsilon) S - \varepsilon S_1 = (\varepsilon - \eta) S_2 \qquad (14)$$

Решая совместно уравнения (9) и (12), получаем

$$S = \frac{\frac{W_{\min}}{2H_э}(1-\varepsilon) + (\varepsilon - \eta)\eta S_2}{(\frac{H_1}{H_э} - \varepsilon)\frac{H_1}{H_э}} \qquad (15)$$

$$S_1 = \frac{\frac{W_{\min}}{2H_э}(1-\varepsilon) - (\varepsilon - \eta)(\frac{H_1}{H_э} - \eta) S_2}{\frac{H_1}{H_э}\varepsilon} \qquad (16)$$

В табл. 2 приведены расчётные значения коэффициента ε для судов бункерного типа в зависимости от предела текучести R_{eH} материала верхних связей эквивалентного бруса (комингса, палубы, ширстрека и верхнего пояса внутреннего борта). В качестве материала остальных связей корпуса бункерных судов используется сталь обычной прочности с пределом текучести R_{eH}=235 МПа. Для сравнения в табл. 3 приведены фактические значения коэффициента ε для некоторых судов бункерного типа.

Таблица 2

Расчётные значения коэффициента ε для судов бункерного типа

R_{eH}, МПа		235	315	355	390
Коэффициент ε при классе судна	«М-СП». «М-ПР», «М»	0,46	0,40	0,38	0,36
	«О-ПР, «О»,»Р», «Л»	0,44	0,38	0,36	0,35

Корпуса нефтеналивных танкеров полностью изготавливаются из одной марки стали. Независимо от предела текучести материала расчётное значение коэффициента ε равно ε=0,46 для танкеров классов «М-СП», «М-ПР». «М», и ε=0,44 для танкеров классов «О-ПР», «О», «Р» и «Л». Фактические значения коэффициента ε для некоторых нефтеналивных танкеров приведены в табл. 4.

Таблица 3

Фактические значения коэффициента ε для судов бункерного типа

Проект	791	1743	507	507А
Класс	М	М	О	О
R_{eH}, МПа	295	295	315	345
Коэффициент ε	0,39	0,35	0,38	0,36

Таблица 4

Фактические значения коэффициента ε для нефтеналивных танкеров

Проект	558	1577	Р77	587
Класс	М	М	О	О
Коэффициент ε	0,46	0,46	0,46	0,43

Как видим, расчётные и фактические значения коэффициента ε для судов обоих типов близки. Величина этого коэффициента меняется в пределах ε=0,35÷0,46. Значение η находится ориентировочно в пределах η=0,12÷0,22

Вместо (15) и (16) можно записать

$$S = \frac{W_{\min}}{2H_1}\frac{1-\varepsilon}{\frac{H_1}{H_э}-\varepsilon} + k_1 S_2 \tag{17}$$

$$S_1 = \frac{W_{\min}}{2H_1}\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} - k_2 S_2 \tag{18}$$

где

k_1 – коэффициент, учитывающий влияние второго дна на приведённую площадь поперечного сечения верхнего пояса эквивалентного бруса;

k_2 – коэффициент. учитывающий влияние второго дна на приведённую площадь нижнего пояса эквивалентного бруса.

Коэффициенты k_1 и k_2 определяются по формулам

$$k_1 = \frac{(\varepsilon-\eta)\eta}{(\frac{H_1}{H_э}-\varepsilon)\frac{H_1}{H_э}} \tag{19}$$

$$k_2 = \frac{(\varepsilon - \eta)(\frac{H_1}{H_э} - \eta)}{\varepsilon \frac{H_1}{H_э}} \qquad (20)$$

Значения коэффициента k_1 для судна бункерного типа приведены табл. 5., а для нефтеналивного танкера в табл. 6.

Таблица 5

Величина k_1 для судна бункерного типа

H_1/ $H_э$	η	Величина k_1 при ε . равном		
		0.35	0.40	0.46
0,85	0	0	0	0
	0.10	0,039	0,078	0,108
	0.15	0,070	0,098	0.140
	0.20	0,070	0.104	0,157
0,70	0	0	0	0
	0.10	0,102	0,143	0,214
	0.15	0,122	0,178	0,277
	0.20	0.122	0,190	0.310

Таблица 6

Величина k_1для нефтеналивного танкера

H_1/ $H_э$	η	Величина k_1 при ε, равном	
		0.44	0.46
1	0	0	0
	0.10	0,061	0,067
	0,15	0,078	0,086
	0.20	0.086	0,096

Соответствующие значения коэффициента k_2показаны в табл. 7 и в табл. 8.

Таблица 7

Величина k_2для судна бункерного типа

H_1/ $H_э$	η	Величина k_2 при ε . равном		
		0.35	0.40	0.46
0.85	0	1.000	1.000	1.000
	0.10	0,630	0,662	0,690
	0,15	0,470	0,514	0,555
	0.20	0.329	0.382	0,432
0.70	0	1,000	1,000	1,000
	0.10	0,612	0,643	0,671
	0,15	0,449	0,491	0,529
	0.20	0.306	0.357	0.404

Таблица 8

Величина k_2 для нефтеналивного танкера

$H_1/H_э$	η	Величина k_2 при ε . равном	
		0.44	0.46
1	0	1.000	1.000
	0.10	0,695	0,704
	0,15	0,560	0,573
	0.20	0.432	0,452

Как следует из таблиц 5÷8, наличие второго дна влияет на величину приведённых площадей поперечного сечения. как верхнего (S), так и нижнего (S_1) поясов эквивалентного бруса. Влияние S_2 на величину S возрастает по мере увеличения высоты двойного дна и удаления нейтральной оси от настила второго дна. При высоте двойного дна $h_{ДД}$=0 коэффициент k_1 равен нулю. Для судна бункерного типа по мере снижения центра тяжести площади верхнего пояса (уменьшения H_1) влияние S_2 на величину S заметно возрастает.

Наиболее существенно влияние двойного дна на величину приведённой площади поперечного сечения днища S_1. Это влияние, естественно, увеличивается по мере снижения высоты двойного дна, повышения положения нейтральной оси, и уменьшается по мере увеличения $h_{ДД}$.

В решаемой задаче не известно положение центра тяжести верхнего пояса эквивалентного бруса бункерного судна, так как изначально не известны размеры его связей. К тому же, возможны разные варианты конструктивного оформления верхнего пояса, зависящие от уровня нормальных напряжений общего изгиба судна (рис. 5). Поэтому, величину H_1 следует определять методом последовательных расчётно-конструкторских приближений.

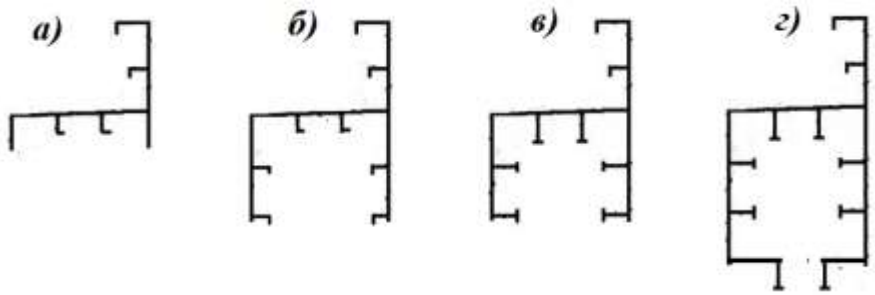


Рис. 5. Возможные варианты конструктивного оформления верхнего пояса эквивалентного бруса судна бункерного типа

Расчеты показывают, что в начале расчета для рассматриваемых типов судов, с достаточной точностью можно величину H_1 принять равной высоте эквивалентного бруса

Список литературы

[1] Российский Речной Регистр. Правила. (в 4-х томах). Т. 2. – Москва 2008. – 408с.
[2] Российский Речной Регистр. Правила. (в 4-х томах). Т. 4. – Москва 2008.– 318с
[3] Свечников О.И. Расчёт и проектирование конструкций судов внутреннего плавания. Учебное пособие / О.И. Свечников, И.И. Трянин.– СПб: Судостроение, 1994. – 376 с.

DESIGN OF BOX-GIRDER ON DOUBLE BOTTOM SHIPS

A.M. Frolov, A.V. Ivanov

Problems of box-girder design on double bottom and twin side vessels at the initial design phases are considered. This article is devoted to the most common ship types, namely dry cargo hopper-shaped carriers and oil tankers. As a first approximation, a box-girder takes the form of two strakes with their area depending on the interrelation of permissible stresses under general bending, strength members' size determined by the specifications of local strength and requirements of the River Register rules, as well as on the actual interrelations based on the statistical processing of currently available ships.

ВЕСТНИК

Волжской государственной академии
водного транспорта

Выпуск 31

2012

Ответственный секретарь *В.С. Пайков*

Печатается по авторскому оригиналу
без редактирования и корректуры

Формат бумаги 70х108 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 13 Уч.-изд. л. 18,2.
Заказ 156. Тираж 500.

Отпечатано в типографии издательско-полиграфического комплекса ВГАВТ
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова,5А

ISBN 978-5-901722-19-0

9 785901 722190