

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «ОДЕССКАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ»

На правах рукописи

ПЕЧЕНЮК АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

УДК 629.5.(012+016+017):532

**МЕТОД ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НОСОВОЙ ЧАСТИ
СУДНА В ЗАДАЧЕ СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЕГО ДВИЖЕНИЮ**

Специальность 05.08.03 – конструирование и постройка судов

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
Давыдов Игорь Филиппович
кандидат технических наук, доцент

Одесса – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	2
Перечень условных сокращений	6
Введение	9
Раздел 1 . Состояние проблемы совершенствования судовых обводов и подходы к ее решению.....	19
1.1. Место проблемы в проектировании судов и теории корабля	19
1.2. Обзор методов исследований	21
1.2.1. Экспериментальные методы	21
1.2.2. Теоретические методы	29
1.2.3. Численные методы	39
1.3. Постановка задачи	50
1.4. Выводы по разделу 1	54
Раздел 2 . Методы ВГД, использованные в работе.....	56
2.1. Программный комплекс	56
2.2. Разработка методики численного моделирования обтекания корпуса	58
2.2.1. Формирование физической модели проекта	59
2.2.2. Постановка задачи численного моделирования.....	61
2.2.3. Контроль выполнения расчета	68
2.3. Результаты численного моделирования эталонных судов	69
2.3.1. Результаты численного моделирования KCS.....	70
2.3.2. Результаты численного моделирования полного тихоходного ССП.....	76
2.4. Опыт проектирования обводов с использованием ВГД	79
2.5. Выводы по разделу 2	80
Раздел 3 . Разработка метода оптимальной трансформации носовой части ..	82
3.1. Модель систематических трансформаций корпуса.....	82
3.1.1. Базовая модель систематических трансформаций.....	86

3.1.2.	Расширенная модель систематических трансформаций	91
3.2.	Метод снижения сопротивления	96
3.2.1.	Теоретический подход	96
3.2.2.	Описание алгоритма совершенствования формы	99
3.3.	Совершенствование обводов полного тихоходного ССП	102
3.3.1.	Объект исследования	102
3.3.2.	Первый шаг алгоритма.....	102
3.3.3.	Второй шаг алгоритма	106
3.3.4.	Анализ функционирования метода.....	110
3.3.5.	Анализ полученных результатов	113
3.3.6.	Практическое решение при модернизации существующих судов.....	115
3.4.	Совершенствование обводов морского судна умеренной полноты и быстроходности KCS	118
3.4.1.	Объект исследования	118
3.4.2.	Результаты исследования	118
3.4.3.	Анализ функционирования метода.....	123
3.4.4.	Анализ полученных результатов	125
3.5.	Выводы по разделу 3	126
Раздел 4 . Экспериментальное исследование ССП.....		128
4.1.	Объекты исследования	130
4.2.	Метод исследования	131
4.2.1.	Экспериментальная установка и модели	131
4.2.2.	Методика модельных испытаний и пересчета их результатов.....	134
4.2.3.	Оценка погрешности измерений.....	136
4.3.	Результаты исследования.....	138
4.4.	Анализ полученных результатов.....	141
4.4.1.	Анализ на качественном уровне	141
4.4.2.	Анализ на количественном уровне.....	146
4.5.	Выводы по разделу 4	149

Раздел 5 . Теоретические и практические результаты.....	151
5.1. Достоверность результатов.....	151
5.2. Методика численного моделирования обтекания корпуса судна.....	154
5.2.1. Масштабный эффект в условиях безотрывного обтекания	156
5.2.2. Масштабный эффект в условиях отрыва ПС.....	158
5.3. Метод оптимальной трансформации носовой части судна.....	162
5.4. Результаты оптимальной трансформации носовых частей объектов	165
5.4.1. Теоретические аспекты	165
5.4.2. Практические аспекты	170
5.5. Выводы по разделу 5	173
Заключение	175
Список использованных источников.....	178
Приложение А Выдержки из лицензионных соглашений на программные продукты, использованные в работе.....	189
Приложение Б Сведения об участниках семинара «Гётеборг-2010».....	191
Приложение В Теоретические чертежи объектов исследований.....	193
Приложение Г Объекты численных исследований ходкости.....	204
Приложение Д Информация о сравнении данных численных и экспериментальных исследований.....	206
Приложение Е Соглашение о научно-техническом сотрудничестве между НУ «ОМА» и ОНМУ	216
Приложение Ж Схема экспериментальной установки (опытовый бассейн гравитационного типа)	219
Приложение З Фотографии испытанных моделей	220
Приложение И Протоколы данных модельных испытаний.....	221
Приложение К Протоколы пересчета данных модельных испытаний.....	238
Приложение Л Фотографии буксировки моделей	241

Приложение М	Оценка сопротивления турбулизаторов	242
Приложение Н	Акты о внедрении результатов работы	244

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЛИС	—	адаптивная локально измельченная сетка
АСФ	—	алгоритм совершенствования формы
АЦП	—	аналогово-цифровой преобразователь
ВАК	—	Высшая аттестационная комиссия
ВГД	—	вычислительная гидродинамика
ВДРК	—	Волго-Донской речной канал
ГД	—	главный двигатель
ГУ	—	граничное условие
ДП	—	диаметральная плоскость
ЗАО	—	закрытое акционерное общество
КБ	—	конструкторское бюро
КВЛ	—	конструктивная ватерлиния
КГНЦ	—	Крыловский государственный научный центр
КФЛ	—	Курант–Фридрихс–Леви (параметр в численных методах)
ЛИВТ	—	Ленинградский институт водного транспорта
МИБ	—	Морское Инженерное Бюро
МКОБ	—	Международная конференция опытовых бассейнов
МСТ	—	модель систематических трансформаций
МСС	—	морское сухогрузное судно
НИР	—	научно-исследовательская работа
НП	—	носовой перпендикуляр
НТУ	—	Национальный технический университет
НУК	—	Национальный университет кораблестроения
НУ «ОМА»	—	Национальный университет «Одесская морская академия»
ОНМУ	—	Одесский национальный морской университет
ООО	—	общество с ограниченной ответственностью
ОП	—	основная плоскость
ОРП	—	ограниченный район плавания
РО	—	расчетная область

ПК	–	программный комплекс
ПКБ	–	проектно-конструкторское бюро
ПС	–	пограничный слой
ПО	–	программное обеспечение
ПЭВМ	–	персональная электронно-вычислительная машина
САПР	–	система автоматизации проектирования
СИА	–	система инженерного анализа
СКО	–	среднее квадратичное отклонение
ССП	–	судно смешанного плавания
США	–	Соединенные Штаты Америки
ЦВ	–	центр величины
ЦМКБ	–	центральное морское конструкторское бюро
ЭУ	–	энергетическая установка
3D	–	three-dimensional (трехмерный)
BSRA	–	British Shipbuilding Research Association (Британская судостроительная исследовательская ассоциация)
CFD	–	computational fluid dynamics (вычислительная гидродинамика)
DES	–	detached eddy simulation (моделирование отдельных вихрей)
DNS	–	direct numerical simulation (прямое численное моделирование)
DTMB	–	David Taylor Model Basin (Опытный бассейн им. Дэвида Тэйлора)
FCSCCL	–	Fundación Centro de Supercomputación de Castilla y León (Фонд суперкомпьютерного центра Кастилии и Леона)
HPC	–	high performance computing (высокопроизводительные вычисления)

ITTC	–	International Towing Tank Conference (Международная конференция опытовых бассейнов)
KCS	–	Korean container ship (корейский контейнеровоз)
KRISO	–	Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (Корейский исследовательский институт судов и океанотехники)
KVLCC2	–	Korean very large crude carrier 2 (корейский очень крупный перевозчик нефти 2)
LES	–	large eddy simulation (моделирование крупных вихрей)
MOERI	–	Maritime & Ocean Engineering Research Institute (Исследовательский институт море- и океанотехники)
SNAME	–	Society of Naval Architects and Marine Engineers (Общество инженеров-кораблестроителей и морских инженеров)
SST	–	shear stress transfer (перенос касательных напряжений)
URANS	–	unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (нестационарное уравнение Рейнольдса)
VLCC	–	very large crude carrier (очень крупный перевозчик нефти)
VOF	–	volume of fluid (объем жидкости)

ВВЕДЕНИЕ

В период современного промышленного судостроения вопросы проектирования судов усилиями многих исследователей в основном были приведены в соответствие с современными научными принципами. Однако степень реализации этого подхода все еще неравномерна по различным областям. Несмотря на весьма существенный объем накопленных знаний, вопросы проектирования и оптимизации формы корпуса в современной практике слабо формализованы: они решаются с помощью комбинации научных знаний, инженерного опыта и критериев из области искусства.

Научная проблема, связанная с оптимизацией формы корпуса, в теории корабля является одной из ключевых. Она обусловлена недостаточной изученностью влияния формы корпуса на параметры, определяющие ходовые качества. Проблема тесно связана с адекватной оценкой буксировочного сопротивления, силы засасывания, а также формализованным описанием геометрии корпуса.

На различных уровнях, от разработки одиночных проектов, до поисков оптимальных судовых форм, применялись и продолжают применяться экспериментальные, теоретические и численные методы исследования.

Экспериментальный подход при высокой надежности определения сопротивления реализуется как метод проб и ошибок. Активно развивающиеся методы численного моделирования в методологическом отношении близки к экспериментальным.

Относительная системность в использовании экспериментальных результатов была достигнута за счет статистических методов, основанных на результатах специальных серийных испытаний и статистической обработке данных из архивов гидродинамических лабораторий. Однако эта системность распространилась лишь на уровень наиболее значимых показателей — соотношений главных размерений, а не всех показателей формы корпуса.

В рамках теоретического подхода известны исследования с глубокой проработкой методологической базы, которая из-за проблем оценки сопротивления нашла лишь ограниченное практическое применение.

Эта ситуация в последовательности проектирования соответствует разрыву между начальной стадией, когда обосновываются основные показатели формы корпуса, и заключительной, на которой выполняется экспериментальное исследование ходовых качеств судна. Наличие разрыва приводит к тому, что в процессе проектирования качество судовых обводов трудно контролировать.

В настоящей работе предложен метод, позволяющий изучать влияние формы корпуса водоизмещающих судов на сопротивление движению на систематической основе. Внимание в работе уделено исключительно обводам носовой части.

Актуальность темы обусловлена исключительной важностью комплексного исследования влияния формы судовых обводов на сопротивление движению, что способствует совершенствованию процесса проектирования, улучшению проектных показателей и экономической эффективности судна.

Влияние формы корпуса на сопротивление и ходовые качества напрямую сказывается на основных технико-эксплуатационных и экономических показателях судна, включая провозоспособность и энергоэффективность. Поэтому совершенствование обводов на начальных этапах проектирования имеет большое практическое значение. Именно обеспечение наилучших ходовых качеств является одним из приоритетных запросов судовладельца, который обычно строго оформляется контрактом на судно в виде требования к сдаточной скорости. При этом форма обводов одновременно определяет и другие мореходные качества, поэтому совершенствование судовых обводов должно быть гармонизовано с ними в рамках проектного процесса.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Направление диссертационного исследования отвечает Закону Украины «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» № 3715-VI від 08.09.2011 (редакція від 05.12.2012), ст. 4 «Стратегічні пріоритетні напрями інноваційної

діяльності на 2011-2021 роки» (п. 2 «освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки»); положенням Транспортной стратегии Украины на период до 2020 г. (решения Кабинета Министров Украины от 20.10.2010 г., № 2174-р); решению Совета национальной безопасности и обороны Украины от 16.05.2008 г. «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (указ Президента Украины от 20.05.2008 г. № 463/2008).

Диссертация включает результаты научно-исследовательской работы (НИР) «Исследование усовершенствованных обводов для полного тихоходного судна с помощью теоретических и экспериментальных методов» № 0115U005602, выполненной в соответствии с планами научных исследований кафедры «Теория и устройство судна» НУ «ОМА», где соискатель участвовал как исполнитель, а также результаты работ в рамках Соглашения о научно-техническом сотрудничестве между кафедрами теории и устройства судна НУ «ОМА» и теории и проектирования корабля им. Ю.Л. Воробьева ОНМУ (см. Приложение Е).

Объектом исследования является процесс проектирования формы корпуса водоизмещающих судов.

Предметом исследования является форма обводов носовой части корпуса водоизмещающих судов.

Целью диссертационной работы является разработка метода определения оптимальной трансформации носовой части водоизмещающих судов с целью снижения сопротивления их движению.

Основные задачи научного исследования. Для достижения цели работы предусмотрено решение следующих задач:

1. Анализ современного состояния проблемы совершенствования судовых обводов, формулировка критерия качества обводов и постановка задачи исследования.

2. Разработка методики определения сопротивления судна методами вычислительной гидродинамики (ВГД), оценка ее адекватности и границ применимости.
3. Разработка математической модели и программного обеспечения модели систематических трансформаций (МСТ), позволяющей автоматизировать проектирование формы корпуса судна в соответствии с варьированием распределения водоизмещения.
4. Разработка метода снижения сопротивления корпуса судна, использующего методику определения сопротивления методами ВГД, а также МСТ формы корпуса.
5. Применение метода оптимальной трансформации к носовым частям тестовых судов для всестороннего анализа его работы на конкретных примерах.
6. Оценка адекватности и надежности метода с помощью модельного эксперимента в опытовом бассейне.

Методы исследования. В исследовании задействованы теоретические, численные и экспериментальные методы гидромеханики и теории корабля. В методологическом отношении задача совершенствования обводов рассмотрена во взаимосвязи с теорией проектирования судов. Для исследования влияния трансформаций носовой части корпуса на буксировочное сопротивление в работе широко использовались методы ВГД, основанные на численном решении уравнений вязкой жидкости. Трансформация теоретических корпусов объектов исследования осуществлялась с помощью специально разработанных автором средств современных графических САПР. При подготовке работы использовалось лицензионное программное обеспечение, доступ к которому предоставлен ООО “Digital Marine Technology” (см. Приложение А).

Диссертация базируется на трудах отечественных и зарубежных ученых в области теории корабля и теории проектирования судов, в том числе большое влияние на нее оказали работы А.Ш. Готман, А.А. Костюкова, М.Г. Крейна, И.О. Мизина, Л.М. Ногида, Г.Е. Павленко, В.М. Пашина, В.Г. Сизова,

Т.Н. Havelock, Т. Inui, Н. Lackenby, L. Larsson, Н.С. Raven и др. В части практической реализации работа развивает направление, сформированное В.Г. Сизовым. Численные методы, сыгравшие большую роль при подготовке работы, разработаны научным коллективом во главе с А.А. Аксеновым, А.А. Дядькиным, В.И. Похилко.

На защиту выносятся основные результаты работы – совокупность теоретических, методических и практических вопросов, связанных с задачей совершенствования носовых обводов судна для снижения сопротивления движению, изложенных в выводах к соответствующим разделам. Кроме того, на защиту выносятся **научное положение**, сформулированное на основе результатов решения задачи:

Влияние формы носовой части на волновое сопротивление судна определяется зависимостью локального коэффициента продольной полноты от продольной координаты, отнесенной к длине поперечной волны.

Научная новизна работы состоит в создании комплексного метода оптимальной трансформации носовой части водоизмещающих судов, который отличается от известных ранее, декомпозицией продольного и вертикального распределения полноты судовой поверхности, и установлении зависимостей влияния распределения полноты на буксировочное сопротивление судна. Получены следующие новые результаты:

1. **Усовершенствована** методика численного моделирования процесса обтекания судовых корпусов путем включения в нее рекомендаций по назначению продольных размеров расчетной области для судна заданных главных размерений, а также по формированию областей концентрации ячеек прямоугольной расчетной сетки, разрешающей обтекающий судовой корпус поток. Усовершенствования методики, выполненные на основе систематизации параметров и результатов произведенного моделирования обтекания корпусов 47 судов различной формы и скоростных режимов движения, обеспечили выполнение расчетов буксировочного сопротивления эталонных судов с точностью,

соответствующей уровню современных мировых стандартов в сравнении с надежными данными экспериментальных исследований.

2. **Впервые** предложена математическая модель систематических трансформаций формы корпуса, основополагающим принципом которой явилось использование локального коэффициента продольной полноты в качестве характеристики продольного распределения водоизмещения. Модель осуществляет варьирование величины и продольного распределения водоизмещения носовой части корпуса путем изменения ограниченных участков ее поверхности, что позволяет исследовать тонкие эффекты влияния относительно малых трансформаций судовой поверхности на буксировочное сопротивление, при которых изменения водоизмещения составляют порядка десятых долей процента.
3. На базе предложенной модели систематических трансформаций разработан метод снижения сопротивления движению судна, в основу которого **впервые** введено предположение о независимости влияния формы разных участков носовой части корпуса, выделенных по длине судна, на его буксировочное сопротивление. Метод обеспечивает надежную оценку влияния трансформаций судовой поверхности на буксировочное сопротивление и позволяет определять комбинацию трансформаций, соответствующую оптимальной форме носовой части по критерию минимального удельного сопротивления корпуса судна.
4. **Получило дальнейшее развитие** исследование задачи о влиянии формы судового корпуса на его буксировочное сопротивление на основе анализа результатов применения метода к двум разным по характеру обводов и скоростному режиму судам, которые были подтверждены для одного из них специальным экспериментальным исследованием в опытовом бассейне. Согласно данным выполненных исследований, продольное перераспределение водоизмещения в носовой части судов является главным фактором в снижении их буксировочного сопротивления.

5. В результате обобщающего анализа усовершенствованных с помощью метода носовых обводов судов *впервые* установлено, что влияние формы носовой части на волновое сопротивление судна определяется зависимостью локального коэффициента продольной полноты от продольной координаты, отнесенной к длине поперечной волны. Использование указанной зависимости способствует упрощению и формализации задачи поиска формы носовой части, обеспечивающей минимальное полное сопротивление судна.

Практическая ценность полученных результатов:

1. Разработанная методика численного моделирования обтекания корпуса обеспечивает корректный подход к определению буксировочного сопротивления судов различного типа в широком диапазоне скоростных режимов, что может использоваться в практическом проектировании для отработки формы корпуса и исследования ходовых качеств.
2. Метод оптимальной трансформации носовой части, реализованный в виде представленного алгоритма, позволяет оптимизировать параметры продольного распределения водоизмещения в носовой части, которые до сих пор не были охвачены формальными методиками или достаточно подробными рекомендациями, что расширяет методологическую базу теории проектирования и обеспечивает повышение проектных показателей и экономической эффективности судов.
3. Модель систематических трансформаций, реализованная в САПР T-FLEX, позволяет осуществлять согласованные трансформации теоретической поверхности корпуса, представленного 3D моделью, что может использоваться в практическом проектировании.
4. Полученные результаты совершенствования носовых обводов имеют практическое значение для проектирования новых судов.
5. Результаты совершенствования носовых обводов судов смешанного плавания (ССП) имеют практическое значение для модернизации существующих судов, причем результаты исследования бульбовой

наделки отличаются высокой степенью готовности к практическому использованию.

Внедрение результатов диссертации. Результаты диссертационной работы внедрены в рамках НИР «Исследование усовершенствованных обводов для полного тихоходного судна с помощью теоретических и экспериментальных методов» № 0115U005602 кафедры «Теория и устройство судна» НУ «ОМА»; в учебный процесс НУ «ОМА» на кафедре «Теория и устройство судна». Методика численного моделирования обтекания корпуса и метод оптимальной трансформации носовой части в целом внедрены в рабочий процесс ООО “Digital Marine Technology” (Одесса, Украина) для отработки формы корпуса и исследования ходовых качеств судов на этапе проектирования. Также методика численного моделирования буксировки судна внедрена в рабочий процесс компании «ТЕСИС» (Москва, Россия) для тестирования и совершенствования программного комплекса (ПК) FlowVision, а также составления рекомендаций пользователям. Результаты, полученные с помощью методики численного моделирования обтекания корпуса и метода оптимальной трансформации носовой части, использовались в проектах судов Морского Инженерного Бюро (МИБ, Одесса, Украина).

Личное участие соискателя. Диссертационная работа является законченным научным исследованием. Все теоретические и практические результаты диссертации были получены соискателем лично.

В научных публикациях, подготовленных в соавторстве, автору принадлежат следующие результаты:

- аналитический обзор методов исследования ходовых качеств судов – в труде [54];
- разработка и применение методики численного моделирования обтекания судна в задачах проектирования формы корпуса и исследования ходовых качеств судов – в трудах [4, 6, 7, 10, 15, 18, 55, 67, 73, 74, 77, 99];

- разработка и применение метода оптимальной трансформации носовой части судна в процессе его проектирования для снижения сопротивления движению – в трудах [66, 73];
- разработка усовершенствованных обводов ССП, выполнение по ним численных расчетов, обработка и анализ результатов экспериментов – в трудах [6, 7].

Апробация результатов работы.

Результаты диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на следующих научно-технических конференциях:

- I Международный форум молодых морских лидеров в рамках 4-й Всемирной морской технологической конференции (Россия, г. Санкт-Петербург, Центральный военно-морской музей, 1 июня 2012 г.);
- III Международная научно-техническая конференция "Инновации в судостроении и океанотехнике" (Украина, г. Николаев, НУК, 4-6 октября 2012 г.);
- Международная конференция «Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека» (Украина, г. Одесса, ОНМА, 16–17 ноября 2012 г.);
- 3rd International Conference on High Performance Computing (HPC-UA 2013) (Украина, г. Киев, НТУ «Киевский политехнический институт», 7-11 октября 2013 г.);
- Всеукраинская научно-техническая конференция "Современные технологии проектирования, построения, эксплуатации и ремонта судов, морских технических средств и инженерных сооружений" (Украина, г. Николаев, НУК, 21-23 мая 2014 г., 20-22 мая 2015 г.);
- III Международная научно-техническая конференция «Экспериментальные методы теории корабля» (Украина, г. Николаев, НУК, 8-10 октября 2014 г.);
- 3rd National CFD Conference of Shipbuilding and Marine Engineering (KHP, г. Далянь, Даляньский морской университет, 25-26 июля 2014 г.);

- Международные форумы «Инженерные системы-2012-2015» (Россия, г. Москва, Международный информационно-выставочный центр «ИнфоПространство», 10-11 апреля 2012 г., 15-16 апреля 2013 г., 7-8 апреля 2014 г., 6-7 апреля 2015 г.);
- 16th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean IMAM 2015 – Towards Green Marine Technology and Transport (Хорватия, г. Пула, 21-24 сентября 2015 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 22 научных труда, из них: 7 отражают основные научные результаты (4 в сборниках научных трудов, рекомендуемых перечнем ДАК МОН Украины, из них один без соавторов, и 3 в иностранных журналах, в соавторстве); 10 трудов апробационного характера, из которых 5 без соавторов и 5 в соавторстве; 5 статей, дополнительно отражающих результаты диссертации (2 без соавторов и 3 в соавторстве); 2 труда из перечисленных включены в библиографическую и реферативную базу “Scopus”.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников и тринадцати приложений. Диссертация содержит 177 страниц основного материала, 85 рисунков, 17 таблиц, 101 наименование литературных источников. Объем приложений составляет 73 страницы.

РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СУДОВЫХ ОБВОДОВ И ПОДХОДЫ К ЕЕ РЕШЕНИЮ

1.1. Место проблемы в проектировании судов и теории корабля

Судовые обводы определяют форму корпуса, который является основным компонентом пропульсивного и, одновременно, всего гидродинамического комплекса судна (рис. 1.1). Пропульсивный комплекс обеспечивает ходовые качества, тесно связанные с основными технико-эксплуатационными и экономическими показателями. Гидродинамический комплекс обеспечивает все мореходные качества судна. Это делает вопрос о рациональном выборе обводов особенно актуальным на этапе проектирования.

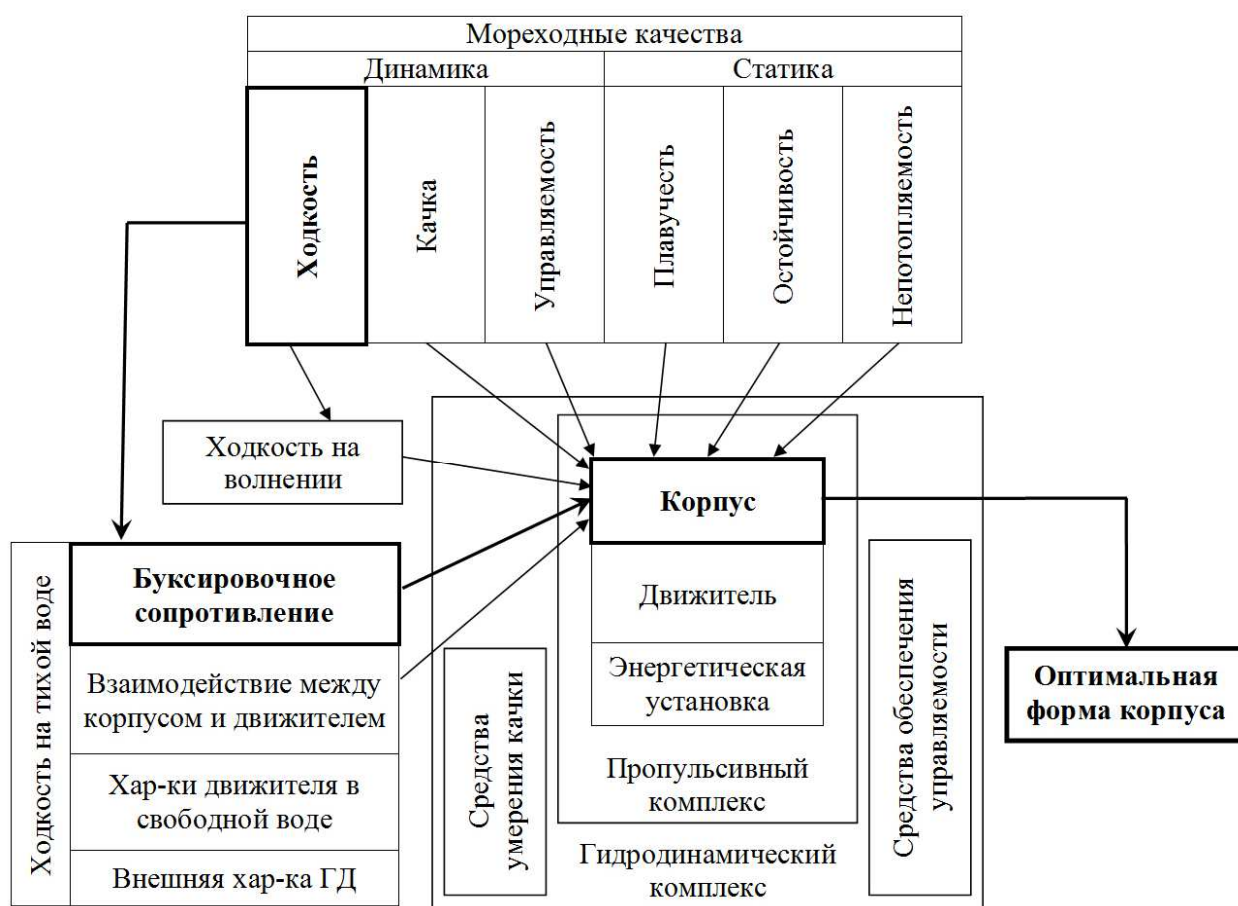


Рисунок 1.1 – Взаимосвязь между формой корпуса и мореходными качествами

Ходовые качества судна объединяют в себе показатели сопротивления корпуса на тихой воде, взаимодействия корпуса и двигателей, ходкости в условиях ветра и волнения.

В сложившейся судостроительной практике контрактами достаточно строго оговаривается сдаточная скорость судна. На проектном этапе это выдвигает повышенные требования к точности определения параметров ходкости на тихой воде, которая определяется сопротивлением корпуса и взаимодействием корпуса с движителями, причем роль сопротивления наиболее значима.

В теории корабля буксировочное сопротивление корпуса традиционно выделяют как наиболее весомый показатель. Например, в книге А.А. Костюкова [30] сказано следующее: «При проектировании судов необходимо стремиться к тому, чтобы главные размерения и форма обводов обеспечивали возможно меньшую величину сопротивления движению, а также наиболее полно удовлетворяли и другим мореходным качествам, требования к которым обусловлены техническим заданием». В [30] также сделано важное пояснение о том, что следует обеспечить наименьшее удельное сопротивление R/Δ , т.е. наименьшее сопротивление на тонну водоизмещения при заданной скорости.

Буксировочное сопротивление часто рассматривают изолированно для упрощения исследовательских задач, так как изучение взаимосвязей между ходовыми качествами в целом и формой корпуса представляет очень большие трудности. Комплексная оценка требует учета всех аспектов, так как изменения формы, снижающие буксировочное сопротивление, могут привести к росту дополнительного сопротивления на взволнованном море или уменьшению коэффициента влияния корпуса.

В большинстве известных исследований взаимосвязь между формой корпуса и ходовыми качествами рассматривалась на основе только буксировочного сопротивления. Примером изучения задачи в более общей постановке является кандидатская диссертация В.Г. Сизова [60], где речь идет о проектировании формы судна наивысших пропульсивных качеств. В.Г. Сизов в работе [60] показал, что его подход позволяет работать над оптимизацией суммарной силы, действующей на корпус, которая состоит из буксировочного сопротивления и засасывания. Такая постановка позволяет полностью охватить ходовые качества судна на тихой воде.

Одним из ключевых вопросов в исследовании взаимосвязей между формой корпуса и ходовыми качествами является подход к определению показателей ходкости для заданной формы, то есть к решению первой (прямой) задачи. В настоящее время существует три подхода: экспериментальный, теоретический и численный. Методы совершенствования судовых обводов, в которых требуется решение второй, обратной задачи, используют аналогичные подходы непосредственно (где это возможно) или косвенно – путем анализа большого числа результатов решения первой задачи. Поэтому в следующем далее обзоре методы совершенствования обводов сгруппированы в соответствии с используемыми в них подходами.

1.2. Обзор методов исследований

1.2.1. Экспериментальные методы

Со времени создания У. Фрудом первой методики проведения буксировочных испытаний моделей в опытовом бассейне [27, с. 194] экспериментальный подход к определению сопротивления корпуса и в целом ходовых качеств судна остается наиболее надежным и продолжает широко использоваться. Экспериментальные исследования ходкости проектируемых судов вошли в судостроительную практику на рубеже XIX – XX вв., то есть охватывают практически весь период современного промышленного судостроения. Как следствие, именно экспериментальный подход обеспечил получение основного объема знаний и практических решений.

Определение буксировочного сопротивления корпуса, представленного масштабной моделью, является, в рамках существующих методик проведения испытаний и пересчета их результатов, стандартной задачей. Однако решение второй задачи (получение обводов с заданными показателями) с помощью экспериментального подхода напрямую невозможно. Для обоснования выбора главных размерений и формы корпуса на начальных этапах проектирования сложилась практика использования результатов специальных серийных

испытаний и систематизированных экспериментальных данных, накопленных в архивах опытовых бассейнов.

В таких случаях влияние геометрических характеристик корпуса на ходовые качества может быть учтено на основании результатов испытаний серий моделей с систематической вариацией элементов теоретического чертежа. При использовании этих результатов условия геометрического подобия оцениваются с помощью характеристик, изменяемых в серии, с учетом общего характера формы корпуса.

Рассмотрим классификацию основных элементов теоретического чертежа и их характерные особенности согласно [68]:

1. Характеристики общей полноты – коэффициент общей полноты C_B , коэффициент продольной полноты C_P .
2. Соотношения главных размерений – отношение длины к ширине L/B , относительная длина $L/V^{1/3}$, отношение ширины к осадке B/d .
3. Характеристики продольного распределения водоизмещения – продольное положение ЦВ X_{CB} , отношение коэффициентов полноты носовой и кормовой оконечностей, отношение коэффициентов полноты носового и кормового заострений.
4. Характеристики вертикального распределения водоизмещения – коэффициенты вертикальной полноты C_{VP} оконечностей, возвышение ЦВ над ОП $\overline{KB}$, форма носовых и кормовых шпангоутов.
5. Характеристики формы мидель-шпангоута – коэффициент полноты C_M , радиус закругления скулы, относительный подъем днища.

Каждая группа геометрических параметров имеет свои характерные особенности, влияющие на их выбор при построении систематических серий.

При проектировании транспортных судов обычно принимают высокие значения коэффициентов полноты, намного выше значений, соответствующих минимуму волнового сопротивления. Поэтому характеристики первой группы являются определяющими по степени влияния на сопротивление для судов с $C_B > 0.6$ и используются в большинстве систематических серий.

При $C_B = \text{const}$ влияние на сопротивление характеристик второй группы, как правило, значительно слабее. Общим свойством для параметров этой группы является аффинность преобразования теоретического чертежа.

Характеристики третьей группы в первом приближении определяют форму строевой по шпангоутам при заданном коэффициенте C_P . Вариация параметров этой группы выполняется обычно методом сдвига.

При постоянных значениях характеристик первых трех групп вертикальное распределение водоизмещения (форма шпангоутов) с достаточной точностью определяет форму, углы входа и схода проектной ватерлинии.

Геометрические характеристики, относящиеся к последней группе, слабо влияют на сопротивление и незначительно изменяются у судов разных типов.

Некоторые геометрические характеристики из разных групп взаимосвязаны. Как видно из соотношения

$$\frac{\left(\frac{L}{B}\right)^2 \frac{B}{d}}{\left(\frac{L}{\nabla^{1/3}}\right)^3 C_B} = \frac{\left(\frac{L}{B}\right)^2 \frac{B}{d}}{\left(\frac{L}{\nabla^{1/3}}\right)^3 C_P C_M} = 1, \quad (1.1)$$

это прежде всего относится к параметрам первой, второй и пятой групп. При некоторых дополнительных условиях изменения теоретического чертежа могут быть независимыми. Такими условиями являются: аффинное изменение чертежа с вариацией соотношений главных размерений, а также изменение характеристик первой группы при $C_B = \text{const}$.

Из (1.1) также следует, что вариация какого-либо соотношения из второй группы возможна только при одновременном изменении хотя бы еще одного из параметров этой группы, который играет роль зависимой переменной.

Для полной оценки влияния элементов теоретического чертежа на сопротивление необходимо получить зависимость сопротивления от одной характеристики из первой, третьей – пятой групп и двух из второй группы. При числе варьируемых переменных $n = 6$ и построении зависимости от каждой из них только по трем значениям ($p = 3$), при постоянных величинах остальных

параметров, количество вариантов в общем случае составит $p^n = 729$. Ни в одной систематической серии испытать столь большое число моделей, естественно, не представляется возможным.

Во всех существующих сериях использовалось меньшее число переменных, выбор которых определялся более узкими задачами. Например, изучение влияния основных геометрических характеристик при их изменении в широких пределах, либо исследование роли отдельных коэффициентов и особенностей теоретического чертежа для проектирования обводов судов конкретного типа.

Среди наиболее крупных систематических серий морских транспортных судов, результаты которых вполне достоверны, можно назвать следующие [64, 68]: 1) серия 60, бассейн DTMB (США), 1953 – 1957 гг.; 2) серии моделей универсальных сухогрузных судов, среднетоннажных танкеров и рудовозов (СССР), 1955 – 1958 гг.; 3) серия моделей быстроходных одновинтовых грузовых судов (Японская судостроительная исследовательская ассоциация), 1964 – 1966 гг.; 4) серия моделей судов с большой полнотой обводов (танкеры, рудовозы) (СССР), 1969 г.; 5) серия моделей крупнотоннажных танкеров (Японская судостроительная исследовательская ассоциация), 1967 – 1969 гг.; 6) серия моделей быстроходных и среднескоростных универсальных сухогрузных, контейнерных и трейлерных судов (СССР), 1972 г.; 7) систематические серии BSRA (Великобритания), 1961 – 1966 гг.

Как отмечено выше, учет влияния изменений формы на основе серийных или систематизированных экспериментальных данных выполняют с помощью некоторого числа прямых расчетов сопротивления по вариантам обводов, заданных элементами теоретического чертежа. Для ускорения расчетов экспериментальные данные часто представляют в специальной форме. Например, результаты серийных испытаний по нескольким типам обводов, характерных для транспортных судов, представлены в ОСТ 5.0181-75 в графическом виде, удобном для ручного счета. В современной практике проектирования очень часто применяются алгоритмы для компьютерных расчетов. Например, большое распространение получил алгоритм Я. Холтропа и Ф. Меннена [86], в основу

которого положен регрессионный анализ большого числа экспериментальных результатов, накопленных Нидерландским институтом гидродинамики.

В то же время не известны или, по крайней мере, не распространены алгоритмы, позволяющие на базе экспериментальных данных получать теоретический корпус хотя бы в виде набора элементов, оптимальных в условиях конкретного проекта, т. е. решать вторую (обратную) задачу. Это можно объяснить тем, что при описании формы корпуса элементами теоретического чертежа на величину сопротивления влияет большое число элементов, и связь между их совокупностью и сопротивлением чрезвычайно сложна. Тем не менее, в настоящее время решение второй задачи в виде автоматизированного поиска на базе систематизированных экспериментальных данных (например, в виде алгоритма [86]) представляется вполне осуществимым.

Серийные или систематизированные экспериментальные данные используют на ранних этапах проекта для оценки сопротивления корпуса, заданного минимальным набором параметров, принятых по прототипу или с использованием эмпирических формул. В этих условиях судить о влиянии формы проектируемых обводов сложно, так как получаемые оценки сохраняют влияние формы обводов испытанных моделей, не учитываемое используемыми параметрами.

В общем случае (вне привязки к конкретной серии или базе результатов) имеется лишь ряд рекомендаций [1, 3, 30, 34, 42, 68] и др., в которых влияние основных параметров формы охарактеризовано для судов различной полноты и быстроходности. Общая идея этих рекомендаций заключается в том, что следует добиваться снижения составляющей сопротивления, которая в данном случае играет основную роль. В этом отношении разделение судов по группам быстроходности является обоснованным, так как роль отдельных составляющих в полном сопротивлении существенно зависит от числа Фруда Fr .

С ростом Fr все большую роль играет волновая составляющая сопротивления, обусловленная затратами энергии на поддержание системы корабельных волн на поверхности воды. Система корабельных волн состоит из

двух основных групп: расходящихся и поперечных волн. Экспериментальные и теоретические исследования волновых движений жидкости объясняют появление этих двух групп волн в случае движения точечного источника возмущений (импульса давления).

При движении объекта судовой формы имеет место более сложный случай, который ближе к движению двух точечных источников, один из которых соответствует скачку давления в носовой оконечности, второй – в кормовой. Обе оконечности создают сходные по форме и расположению волновые системы, каждая с двумя группами волн. В результате интерференции образуется сложный рельеф общей волновой системы на удалении за судном.

Т. Хавелок в 1934 году показал [83], что величина волнового сопротивления на глубокой воде связана с параметрами волновой системы на большом удалении за телом следующим выражением:

$$R_w = \frac{1}{2} \pi \rho V^2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (A(\theta)^2 + B(\theta)^2) \cos^3 \theta d\theta, \quad (1.2)$$

где:

θ – угол между направлением движения объекта и гребнем волны;

ρ – плотность жидкости;

V – скорость движения объекта;

$A(\theta)$ и $B(\theta)$ – функции спектра свободных волн, соответствующие особенностям объекта. Выражение $\sqrt{A(\theta)^2 + B(\theta)^2}$ соответствует амплитуде волнового профиля.

Из формулы (1.2) видно, что волновое сопротивление определяется произведением квадрата амплитуды профиля волны на косинус угла между направлением движения объекта и гребнем волны в кубе.

Установив взаимосвязь между формой обводов и параметрами волновой системы на большом удалении за судном, входящими в формулу (1.2), задачу совершенствования судовых обводов по критерию волнового сопротивления можно решить в полном объеме. Однако установление этой взаимосвязи

представляет собой сложную проблему. Серьезные попытки ее решения были предприняты значительно позже с использованием не только экспериментального, но также теоретического и численного подходов.

Вначале на базе преимущественно экспериментального подхода удалось исследовать характер взаимодействия носовой и кормовой систем поперечных волн. Было замечено, что экспериментальные зависимости коэффициента остаточного сопротивления от Fr имеют местные выпуклости и вогнутости, из-за чего рост сопротивления происходит неравномерно.

Самые заметные модуляции волнового сопротивления удалось объяснить изменениями высоты поперечных волн на удалении за судном, которые, в свою очередь, вызваны совпадениями или несовпадениями фаз носовой и кормовой систем поперечных волн.

Практическое использование интерференции поперечных волн сводится к прогнозу зон выгодных и невыгодных скоростей для судна, заданного длиной и минимальным набором характеристик полноты, либо рекомендациям по выбору длины при фиксированной скорости. Всестороннее исследование этой проблемы выполнено Г.Е. Павленко [42, с. 191].

В целом, оценка влияния наиболее значимых элементов корпуса (соотношений главных размерений и общей полноты) на базе знаний, накопленных в рамках экспериментального подхода, как правило, достаточно надежна, чтобы без большого риска осуществлять их выбор на ранних этапах проектирования. Вместе с тем, и связь этих параметров с общепроектными элементами судна настолько тесная, что на последующих этапах внесение в них изменений крайне затруднено или вообще невозможно.

Гораздо труднее корректно оценить влияние менее значимых параметров продольного и вертикального распределения водоизмещения, как из-за неточностей расчетов, так и потому, что эти параметры определяют характер формы обводов, влияние которого трудно формально выделить из результатов испытаний моделей. Можно заметить, что в серийных испытаниях, также как в алгоритмах систематизации несерийных данных, из всех элементов третьей и

четвертой групп (с. 22) обычно рассматривается только абсцисса ЦВ X_{CB} , чего не достаточно для однозначного распределения водоизмещения в продольном и вертикальном направлениях.

Можно утверждать, что после выбора соотношений главных размерений и характеристик общей полноты, продольное и вертикальное перераспределение водоизмещения остаются наиболее реальными ресурсами проектанта для повышения гидродинамических качеств обводов, поскольку позволяют остаться в рамках относительно небольших (с общепроектной точки зрения) изменений.

Согласно традиционной последовательности проектирования, возможность окончательного уточнения формы корпуса, которая в идеале позволяет достичь наилучшей в условиях проекта комбинации всех показателей, предусмотрена на этапе отработки обводов в опытовом бассейне. Однако на практике она весьма ограничена из-за большого временного разрыва между стадиями подготовки теоретического чертежа и отработки обводов в бассейне; большой трудоемкости и стоимости изготовления моделей для испытаний.

Большая удаленность заключительного этапа (модельных испытаний) от начального (выбора основных элементов и построения теоретического чертежа) приводит к тому, что может потребоваться существенная переработка проекта. Как правило, из-за проблемы сроков ее приходится избегать, за счет чего существенно сужаются возможности повлиять на ходовые качества, что затем отражается на качестве проекта в целом.

Высокая трудоемкость и стоимость изготовления моделей ограничивает число изменений формы корпуса, которые могут быть одновременно рассмотрены на этапе отработки обводов в бассейне. Как следствие, в проектах не рассматривают систематические вариации формы, а определяют ходовые качества нескольких заранее подготовленных вариантов, связь между которыми ограничивается учетом общих проектных характеристик. Как правило, каждый вариант воплощает отдельную концепцию – варианты носовой оконечности с бульбом и без бульба, варианты одновального и двухвального движительного комплекса и т.п. Рекомендуется принять тот вариант, который дал лучшие

результаты. Очевидно, что такой подход не позволяет учесть влияние отдельных локальных изменений и синтезировать окончательную форму корпуса с использованием всей информации, полученной в ходе исследования.

В работе [44] В.М. Пашин предложил искать выход из этой ситуации с помощью методов предбассейновой оптимизации формы корпуса. Включение таких методов в процесс проектирования позволяет заполнить пробел между начальным выбором формы и ее отработкой в бассейне. Тогда за экспериментальным исследованием можно обоснованно оставить функцию окончательной проверки принятых проектных решений.

Первыми методами предбассейновой оптимизации можно считать вариационные задачи, в которых используется теоретический подход к оценке сопротивления корпуса. В большинстве подобных исследований рассматривалось только волновое сопротивление. Краткий исторический обзор развития теоретических методов приведен ниже, а более подробные сведения можно найти, например, в [5, 30].

В [44] отмечены недостатки вариационных задач, и предложен подход, позволяющий их избежать. Этот подход предъявляет специфические требования к формулировке задачи предбассейновой оптимизации и методам ее решения: 1) задача должна формулироваться в терминах математического программирования; 2) необходима специальная модель судовой поверхности (в ее качестве предложена модель из статьи [36]); 3) необходимо корректное разделение задач оптимизации формы и определения элементов судна.

1.2.2. Теоретические методы

Первое теоретическое исследование задачи об определении формы судна наименьшего волнового сопротивления принадлежит Н.Е. Жуковскому (1903) [23]. Пользуясь допущениями линейной теории волн, он рассмотрел обтекание вертикального цилиндра малой ширины, простирающегося до дна водоема ограниченной глубины, со сверхкритической скоростью и нашел, что среди всех ватерлиний, имеющих заданную площадь, минимальное сопротивление имеет параболическая форма. Задача решается методами вариационного исчисления и

относится к так называемым изопериметрическим задачам [63]. В таких задачах требуется отыскать экстремум (минимум или максимум) одного интеграла, при дополнительном условии, чтобы некоторый другой интеграл имел заранее заданную величину.

Дальнейшие исследования задачи об определении формы судна наименьшего волнового сопротивления основывались главным образом на применении знаменитой формулы Дж. Мичелла [69] для вычисления волнового сопротивления тонкого судна на глубокой воде.

Интеграл Мичелла для определения форм наименьшего сопротивления впервые в 1923 г. применил Т. Хавелок. В своей работе он исследовал цилиндрическое тело с бесконечной осадкой.

В 1930 г. Г. Вейнблум в работе [100], а затем в ряде последующих работ развил метод представления судовой поверхности в виде аналитического выражения

$$y = f(x, z) = F(x)H(z), \quad (1.3)$$

в котором $F(x)$ и $H(x)$ – целые рациональные функции, представляющие собой соответственно уравнения ватерлиний и шпангоутов. Эти функции могут быть заданы в виде полиномов. Например, для ватерлиний:

$$F(x) = 1 - \sum_n a_n x^n, \quad (1.4)$$

где a_n – неизвестные величины.

Г. Вейнблум, исходя из представления судовой поверхности полиномами, например вида (1.4) для ватерлиний, применил метод Ритца, чтобы получить различные вариации формы судна с целью приближения ее к формам минимального волнового сопротивления.

Рассматриваемая вариационная задача заметно упрощается для судов с прямостенными бортами. В этом случае уравнение (1.3) переходит в уравнение ватерлинии $y = F(x)$ и найденные коэффициенты a_n определяют формы ватерлиний (а также строевых по шпангоутам), близкие к оптимальным из данного класса форм, например заданного уравнением (1.4).

Расчеты Г. Вейнблума, в частности, показали, что в области малых чисел Fr волновое сопротивление для судов оптимальных форм может быть во много раз меньше волнового сопротивления для судов с обычными параболическими обводами. Оказалось, что изменение отношения T/L почти не влияет на форму оптимальных ватерлиний. Проведенные исследования подтвердили большое значение коэффициента продольной полноты C_p как параметра волнового сопротивления для оптимальных форм судов.

В другой постановке задачу о форме корпуса с минимальным волновым сопротивлением при заданном водоизмещении и контуре ДП, рассмотрел в 1934 г. Г.Е. Павленко [43]. Констатируя отсутствие аналитического оптимума в распределении водоизмещения по высоте, он видоизменил постановку задачи, задав закон распределения водоизмещения по осадке судна и отыскивая оптимальную форму ватерлиний. Таким образом, задача была сведена к определению оптимального распределения водоизмещения по длине судна. В результате решения такой изопериметрической задачи общее условие оптимальности формы судна сводится к интегральному уравнению для определения уравнения поверхности $y = f(x, z) = \varphi[f_1(x), f_2(z)]$, где вид функции f_2 известен. Для частного случая прямого судна с бесконечной осадкой ($f_2 = \text{const}$), интегральное уравнение было получено в виде

$$\int_L f_1(x) I_0\left(\frac{g}{V^2}|x - x_0|\right) dx = \text{const}, \quad (1.5)$$

где I_0 – функция Неймана (функция Бесселя второго рода) нулевого порядка.

Дополнительное условие к уравнению (1.5) состоит в том, что ватерлиния ограничивает заданную площадь.

Г.Е. Павленко применил к решению уравнения (1.5) численный метод, заменив его приближенно системой линейных уравнений для десяти ординат ватерлиний, в которых неизвестными величинами являются ординаты ватерлиний, а коэффициенты могут быть представлены функциями от Fr . Решение этой системы дало ординаты оптимальных ватерлиний для Fr от 0.325 до

0.430. Так как было рассмотрено судно-цилиндр, то полученные результаты относятся и к формам строевой по шпангоутам – в данном случае коэффициенты полноты ватерлинии C_{WP} , водоизмещения C_B и продольной полноты C_P одинаковы.

Выполненные Г.Е. Павленко расчеты показали, что примерно с $Fr = 0.34$ значения коэффициента C_P являются явно завышенными. При высоких Fr найденные формы ватерлиний и строевых по шпангоутам и их коэффициенты полноты не отвечают экспериментальным данным. В оконечностях ватерлинии и строевые имеют чрезмерно большую выпуклость.

В своем исследовании форм минимального волнового сопротивления Г.Е. Павленко опирался на две теоремы. Первая теорема говорит о том, что оптимальное судно симметрично относительно плоскости мидель-шпангоута. Согласно второй теореме, «у судна, имеющего форму наименьшего волнового сопротивления, отношение $r = \delta R / \delta V$ должно быть величиной постоянной, т. е. не зависящей от значения координат x и z ». Вторая теорема тождественна теореме Л. Эйлера [63, с. 224].

Задача в постановке, аналогичной исследованию Г.Е. Павленко, решалась Л.Н. Сретенским [65]. Л.Н. Сретенский методами вариационного исчисления пришел к интегральному уравнению, идентичному полученному Г.Е. Павленко. Он также рассмотрел случай цилиндрического судна бесконечной осадки, однако, анализируя полученное интегральное уравнение, пришел к заключению, что не существует решения поставленной задачи о форме судна минимального волнового сопротивления в классе функций с интегрируемым квадратом производной.

Таким образом, возник вопрос, можно ли при рассмотренных условиях задачи, исходя из формулы Мичелла для тонкого судна, достигать минимума волнового сопротивления при помощи тех функций $y = f(x, z)$, которые бы отвечали судовым формам. Важные выводы по этой проблеме были сформулированы М. Бесшо, Д. Вехаузенем, Д. Котиком.

Вопрос был разрешен М.Г. Крейном в рамках специального исследования [33]. Было показано, что результаты Г.Е. Павленко по математическим причинам ошибочны.

Анализ результатов работы М.Г. Крейна выполнен в фундаментальном труде В.Г. Сизова [62], некоторые сведения из которого приведены ниже.

При решении задачи были заданы: объемное водоизмещение V , форма ДП и скорость V . Определялась форма судна в виде функции $y = f(x, z)$, неотрицательной в пределах ДП и обращающейся в нуль на подводной части ДП, при которой мичеллевское сопротивление имеет минимальное значение.

Установлено, что если ДП ограничена, то существует положительная точная нижняя граница мичеллевского сопротивления, к которой можно подойти как угодно близко за счет выбора функции $y = f(x, z)$. Однако минимум достигается только на обобщенных функциях. Если же ДП не ограничена, то можно найти формы, при которых мичеллевское сопротивление равно нулю.

Далее показано, что если отказаться от условия неотрицательности, то можно построить целый класс функций, обращающих в нуль мичеллевский интеграл даже в том случае, если контур ДП ограничен. Варьирование формы судна такими функциями не изменяет его мичеллевское сопротивление. Если выбрать среди них те, которые одновременно обращают в нуль и водоизмещение, то из заданной формы судна можно построить целый класс форм, обладающих одинаковыми мичеллевскими сопротивлениями.

Если найдена форма наименьшего мичеллевского сопротивления, то существует целый класс форм, обладающих этим же свойством, и среди них будут как симметричные, так и несимметричные. Это свидетельствует о том, что теорема о симметричности формы наименьшего сопротивления, сформулированная Г.Е. Павленко, неверна. Верно лишь менее сильное утверждение о том, что симметризация формы судна при сохранении водоизмещения не увеличивает его мичеллевского сопротивления.

В работе М.Г. Крейна также установлено, что для подводных судов волновое сопротивление имеет точную нижнюю границу, однако она достигается

не при помощи обычных, а лишь обобщенных функций (типа линейных комбинаций функций Дирака). Для надводных судов нижняя граница волнового сопротивления достигается только при помощи функций $F(x)$, имеющих особенности на концах (здесь $F(x)$ – уравнение ватерлинии). Характер особенностей функции $F(x)$ в окрестностях имеет вид:

$$\frac{1}{\sqrt{(L/2)^2 - x^2}}, \quad (1.6)$$

т.е. при $x = \pm L/2$ она обращается в бесконечность.

В средней части интервала ($-L/2 < x < L/2$) функция $F(x)$ может изменить свой знак. Это означает, что минимум мичеллевского сопротивления при тех же условиях задачи будет достигаться при разделении судна на две и большее количество частей – караван судов.

Таким образом, было показано, что интеграл, выражающий мичеллевское сопротивление, при поставленных условиях задачи минимизируется на несудовых формах. В дальнейших исследованиях были предложены различные пути преодоления этой проблемы. Ниже приведены сведения о некоторых из них.

Еще до опубликования результатов работы М.Г. Крейна А.А. Костюков предложил решение задачи о минимальном мичеллевском сопротивлении для судна бесконечной длины [29]. В работе М.Г. Крейна показано, что в таком случае (когда область ДП не ограничена) могут быть найдены формы, обращающие мичеллевский интеграл в нуль.

А.А. Костюков показал, что уравнения ватерлиний бесконечно длинного судна можно подобрать так, что оно будет представлять караван судов, расположенных в кильватерном порядке друг за другом. Такое бесконечное судно-караван состоит из главного (центрального) судна и бесконечного числа добавочных судов, расположенных впереди и позади главного (рассмотрен случай симметрии относительно плоскости мидель-шпангоута). При соответствующем подборе функции ватерлинии ширина добавочных судов быстро уменьшается по мере удаления от центрального, так что ширина ближайших добавочных судов может составлять не более 5% ширины главного судна.

Если выделить из бесконечно длинного судна-каравана, волновое сопротивление которого равно нулю, главное судно, то его волновое сопротивление будет уже отлично от нуля. Задачу снижения волнового сопротивления только главного судна можно решать, стремясь одновременно при подборе функции, задающей ватерлинию, получить возможно меньшие поперечные размеры добавочных судов и быстрое их уменьшение по мере удаления от главного. Выполненные по указанным принципам расчеты для чисел $Fr = 0.28; 0.35; 0.40$ дали формы ватерлиний главного судна, достаточно близкие к оптимальным по экспериментальным данным.

Другой путь, позволяющий избежать вырожденных форм, выражаемых обобщенными функциями или функциями с особенностями на концах, основан на том, что к таким решениям приводит задача о форме с наименьшим мичеллевским, т.е. чисто волновым сопротивлением. Если учесть еще вязкостную составляющую сопротивления, результат изменится. Впервые это было показано в совместном исследовании М.Г. Крейна и В.Г. Сизова [32].

М.Г. Крейн и В.Г. Сизов рассмотрели тонкое судно, сопротивление которого состоит из мичеллевского и вязкостного сопротивления.

Задача сводится к отысканию формы судна, которая давала бы наименьшее суммарное сопротивление при заданном водоизмещении, скорости и контуре ДП. В результате для функции, задающей искомую форму судна, было получено интегральное уравнение. Авторы доказали, что оно имеет единственное решение, являющееся непрерывным. Если решение оказывается и неотрицательным, то оно единственно для поставленной задачи. Когда же решение принимает и отрицательные значения, наименьшее суммарное сопротивление достигается при условии разделения водоизмещения на несколько частей (караван судов).

Еще один способ практического использования формулы Мичелла заключается в формулировке задачи в терминах математического программирования и наложении дополнительных ограничений на геометрические параметры, определяющие форму судовой поверхности. Примером является работа [45] (И.О Мизин, В.М. Пашин), где приведены результаты оптимизации

формы корпуса контейнерного судна, подтверждающие работоспособность подхода. Его недостатком представляется, прежде всего, теоретически неполная постановка задачи. В представленном примере хорошо заметен перенос водоизмещения вниз от действующей ватерлинии, который произошел в результате оптимизации. Это говорит о том, что при трансформации обводов не был учтен известный факт отсутствия оптимума волнового сопротивления в вертикальном распределении водоизмещения.

Новое направление образовали исследования, в которых вместо аналитического задания корпуса его заменяют распределением гидродинамических особенностей. В этом случае особенности нужно распределить таким образом, чтобы получить минимальное значение интеграла Мичелла, либо нулевые амплитуды корабельных волн (безволновые формы). При этом необходимо решить обратную задачу – по оптимальному распределению особенностей найти замкнутые линии тока, которые можно было бы принять за сечения корпуса. Основной вклад в разработку этого метода внес Т. Инуи [87]. Способ перехода от распределения особенностей к форме судовой поверхности в работе [96] подробно исследовал П. Пин.

Т. Инуи в своих работах сочетал теоретические исследования с модельными экспериментами, в которых с помощью измерений волновых систем вычислял волновое сопротивление. Для расчета волнового сопротивления использовалась формула Т. Хавелока (1.2).

Схема, предложенная Т. Инуи, в задачах поиска оптимальных обводов оказалась более продуктивной по сравнению с использованием аналитического описания судовой поверхности, а также дает некоторые уточнения по сравнению с теорией Мичелла. Однако дальнейшие исследования показали, что при использовании интеграла Т. Хавелока следует учитывать еще линейное распределение особенностей по ватерлинии, что приводит к очень большим математическим и вычислительным трудностям [5, часть II, с. 96].

В целом, данное направление уже приближается к использованию методов, получивших общее название численных. По времени (1970-е гг.) это совпадает с развитием численных методов и в других прикладных областях гидродинамики.

Дальнейшее совершенствование теоретических методов в аналитической постановке связано, прежде всего, с уточнением формул для волнового сопротивления. Одним из направлений является рассмотрение судна произвольной формы вместо тонкого судна в интеграле Мичелла. Базовым исследованием в данной области является теория Н.Е. Кочина [31]. Другое направление связано с необходимостью учета нелинейных эффектов. Впервые задача учета нелинейностей была в 1961 г. решена В.Г. Сизовым [59]. Уточнение расчета волнового сопротивления также возможно и при классической постановке. Так, в последние годы А.Ш. Готман выполнила ряд исследований интеграла Мичелла [5], в результате которых ей удалось преобразовать его и выделить главную, не осциллирующую часть интеграла.

Отдельное направление составляет группа теоретических работ, в которых разрабатывались приемы совершенствования формы корпуса судна, основанные на исследовании влияния элементарных изменений.

Впервые Э. Хогнер [85] построил линии влияния для волнового сопротивления, которые дают возможность оценить его изменения при тех или иных малых изменениях формы корпуса вблизи точек (x, y, z) .

В уже упомянутой работе В.Г. Сизова [60] был предложен способ последовательного улучшения формы судна. Способ основан на использовании поверхности вариаций, ординатами которой являются отношения приращений суммарной силы (буксировочное сопротивление и засасывание) к приращениям водоизмещения при элементарных изменениях в различных точках судовой поверхности.

Поверхность вариаций описывает влияние изменений вблизи различных точек на удельное сопротивление. У точек, в которых значения вариаций λ достигают сравнительно больших значений, судовую поверхность выгодно

заострять, перенося объем в районы точек с меньшими λ . В случае оптимального судна значения λ во всех точках одинаковы.

В работе [60] представлен пример расчета ординат поверхности вариаций для судна средней полноты и быстроходности ($C_B = 0.705$, $Fr = 0.316$). Основная роль в выполненном расчете отведена вариациям волнового сопротивления, полученным с использованием формулы Мичелла. Вариации сопротивления трения рассчитаны приближенно при постоянном значении коэффициента трения, сопротивление формы в расчетах не учитывалось, а вариации силы засасывания оценены с использованием модели эквивалентного стока.

Полученная в результате поверхность вариаций (рис. 1.2) указала на выгоду заострения участков перехода между плоским бортом и оконечностями (т. н. «плечи») и переноса водоизмещения непосредственно в оконечности, что хорошо согласуется с экспериментальными данными об оптимальных значениях коэффициента продольной полноты C_p при рассмотренном Fr .

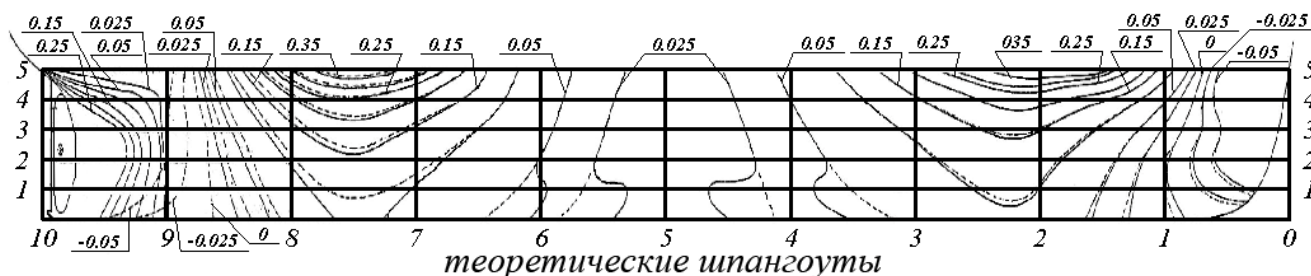


Рисунок 1.2 – Поверхность вариаций в виде изолиний в ДП (вертикальный масштаб удвоен)

Таким образом, были получены важные качественные результаты. В то же время, поверхность вариаций для начальной формы корпуса не может служить надежным основанием для количественной оценки сил, действующих на корпус, при конечных изменениях его формы. Каждой измененной судовой поверхности будет соответствовать и новая поверхность вариаций. При этом на конечном промежутке (y_1, y_2) положений любой точки корпуса существует некоторая зависимость вариации $\lambda = f(y)$. Характер этой зависимости, очевидно,

индивидуален в каждой точке судовой поверхности. Поэтому для описания изменений судовой поверхности $f(x, z)$ в некотором диапазоне (y_1, y_2) , заданном для всех точек, требуется семейство поверхностей вариаций.

При работе с конечными изменениями большое значение приобретают практические способы их задания (согласованного перестроения теоретического чертежа), построения зависимостей $\lambda = f(y)$ на конечных промежутках. К сожалению, эти и многие другие аспекты метода В.Г. Сизова, связанные с его применением в инженерных задачах, остались за рамками работы [60]. Последующие исследования В.Г. Сизова связаны, главным образом, с уточнением теоретических методов нахождения волнового сопротивления.

Со второй половины XX века помимо работ, направленных на уточнение теоретических решений в аналитической постановке, начали появляться исследования, использующие численный подход. Сейчас численным методам уделяется большое внимание, так как по современным представлениям решение многих задач гидродинамики судна, включая задачу о сопротивлении, в общем случае невозможно получить аналитически.

1.2.3. Численные методы

Один из первых численных методов, позволяющий моделировать обтекание идеальной жидкостью трехмерных тел, заданных набором плоских четырехугольных панелей, был разработан Д. Хессом и А. Смитом [84] для авиационной компании «Дуглас» в 1962 г. В центрах панелей располагаются гидродинамические особенности (источники и стоки), интенсивности которых получаются численным интегрированием уравнения Фредгольма 2-го рода. По интенсивностям рассчитывается поле скоростей, давлений и линии тока.

Ближний панельный метод [76], усовершенствованный с добавлением линеаризованного граничного условия для учета свободной поверхности (кроме поверхности тела часть невозмущенной свободной поверхности моделируется распределением источников), был представлен С. Даусоном в 1977 г.

В методе С. Даусона оригинально скомбинированы идеи из нескольких предшествующих исследований, среди которых: теория малой скорости (Е. Бэба и К. Такекума – 1975 г., Дж. Ньюмана – 1976 г.), использование метода источников Рэнкина для моделирования волн на свободной поверхности (К. Бай и Р. Енг – 1974 г.) и близкий в целом, но более ранний (1976) панельный метод Г. Гедда [80].

Хотя метод С. Даусона содержал серьезные недоработки, которые приводили, в частности, к неверным длинам волн и нефизичным осцилляциям скорости при некоторых вариантах расположения панелей у свободной поверхности, выполненные примеры расчетов показали более близкие к эксперименту результаты, чем теория Мичелла. Метод получил большое распространение и использовался для оптимизации обводов в проектировании вплоть до середины 1990-х гг.

Расчетные значения волнового сопротивления, получаемые с помощью метода С. Даусона и его модификаций, весьма правдоподобны для относительно острых судов при высоких Fr (боевые корабли, яхты). Для большинства же транспортных судов это не так. У тихоходных и полных судов волновое сопротивление обычно оказывалось недооцененным, причем для наиболее полных обводов (танкера, балкеры) оно нередко получалось отрицательным, что удалось впоследствии объяснить особенностями линеаризации. Тем не менее, метод дает качественно верную картину волнообразования, что и сделало его популярным в инженерной практике.

Последующее развитие панельных методов происходило в следующих направлениях: учет нелинейности граничных условий (ГУ) на свободной поверхности; назначение ГУ не на среднем уровне невозмущенной поверхности, а непосредственно на расчетной поверхности жидкости; учет взаимодействия свободной поверхности с корпусом выше статической ватерлинии; учет ходового изменения посадки. Эти направления в основном связаны с учетом нелинейностей, так что, в конце концов, приводят к полному отказу от

линеаризации. Конечным результатом развития стали нелинейные панельные методы.

Первый полностью нелинейный метод [101] был предложен Ф. Ксиа в 1986 г., однако его алгоритм не был достаточно проработан для практического использования. Более успешно удалось решить аналогичную задачу Ш.Й. Ни [95], К.Д. Киму [90] и К.Э. Йансену [88], исследования которых легли в основу программного комплекса (ПК) SHIPFLOW. Все перечисленные работы были выполнены в Техническом университете Чалмерса (Гётеборг, Швеция).

Близкие методы разрабатывались также в Институте судостроения Гамбургского университета [89] (Ф. Бертрам и др.) – ПК SHALLO, в Нидерландском институте гидродинамики [97] (Х. Равен) – ПК RAPID, и в других научно-исследовательских организациях.

Наиболее совершенные панельные методы дают хорошие результаты по волновому сопротивлению и форме свободной поверхности (рис. 1.3), но им присущи определенные ограничения. Ограничения связаны, прежде всего, с невозможностью корректно учесть вязкость при использовании допущений потенциального потока. Это приводит к неверному распределению скоростей и давлений вблизи поверхности судна и в попутном потоке, отсутствию отрывов пограничного слоя (ПС), чрезмерно развитой волновой системе из-за недостаточного общего влияния вязкости и отсутствия разрушения волн, и многим другим несоответствиям, которые сильнее всего проявляются у полных и тихоходных судов.

Для моделирования вязкого потока без указанных ограничений используются численные методы, основанные на решении уравнений Навье-Стокса.

Общие теоретические основы таких методов известны достаточно давно (см., например, [26]), они заключаются в численной интерпретации дифференциала переменной величины. Разностные уравнения в исчислении разностей соответствуют дифференциальным уравнениям в дифференциальном исчислении.

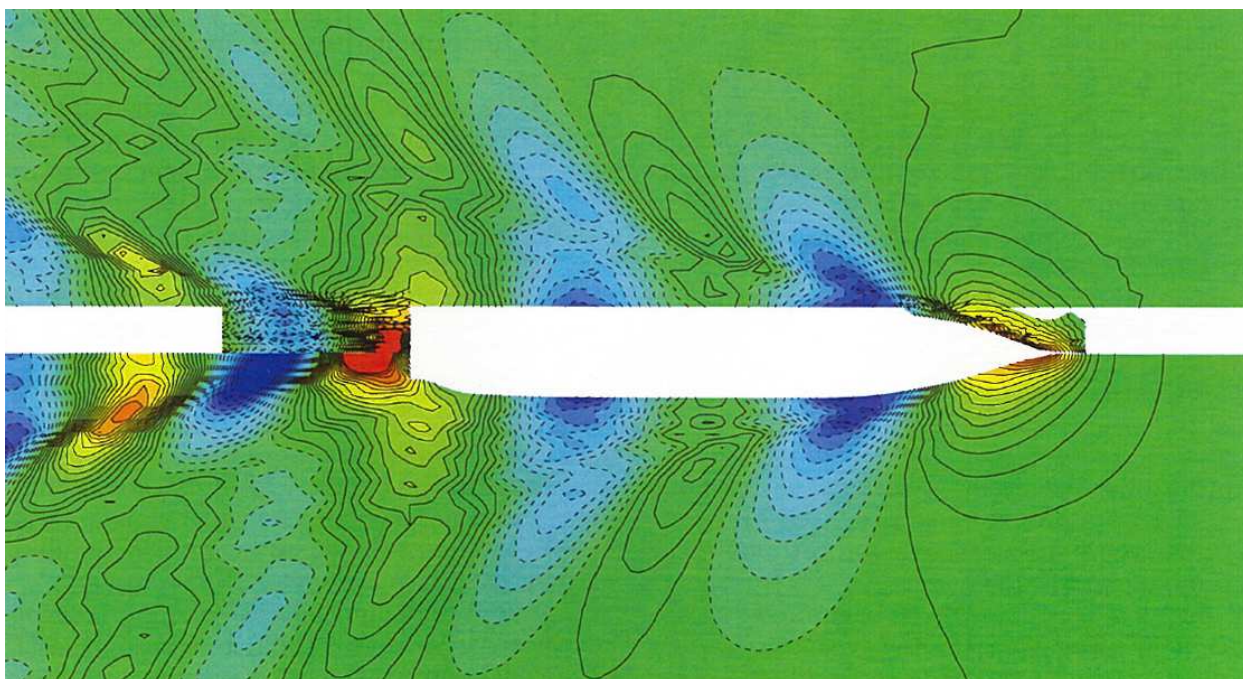


Рисунок 1.3 – Волнообразование модели KCS при $Fr = 0.26$ в эксперименте (вверху) и в расчете ПК RAPID (внизу)

Источник: [94, с. 128]

В вычислительной гидродинамике существует два численных метода, базирующихся на дискретном представлении производных, входящих в уравнения движения. Это метод конечных разностей и метод конечного объема. Они отличаются лишь геометрической интерпретацией: в первом используются расчетные узлы, во втором – грани расчетного объема. Исходная система нелинейных дифференциальных уравнений движения в совокупности с уравнениями состояния и ГУ в виде линеаризованных систем представляется в разностной форме. Производные всех входящих в уравнения неизвестных при этом заменяются с определенным порядком точности разностными аналогами.

Развитие в гидродинамике судна методов моделирования потенциального потока (типа панельных) и методов, основанных на решении уравнений Навье-Стокса, можно условно разграничить по времени с учетом уровня развития вычислительной техники. По мере увеличения вычислительных возможностей становились востребованными все более сложные алгоритмы, способные учитывать дополнительные эффекты и давать более детальные результаты.

В этом отношении методы, основанные на решении уравнений Навье-Стокса, образуют самый современный этап развития численного подхода. В них доступны теоретически наиболее строгие постановки, но и требования к вычислительным ресурсам очень высоки, причем для многих задач им еще не отвечает современная вычислительная техника. Вычислительные ресурсы, необходимые для решения практически значимых задач обтекания судового корпуса, стали доступными только примерно с 2000 г. Панельные методы в настоящее время уже рассматриваются как весьма экономные.

Разработка численных методов с самого начала предпринимались большими коллективами и международными объединениями научных коллективов. Методы, как правило, реализуют в универсальных ПК – системах инженерного анализа (СИА), включающих различные расчетные модели, которые для решения гидродинамических задач из разных прикладных областей могут комбинироваться с различными алгоритмами представления геометрии и построения сеток, решения уравнений, обработки и анализа результатов. Широко распространен обмен расчетными моделями и алгоритмами, поэтому используемые на практике ПК можно рассматривать как результаты целых пластов научных исследований, взаимосвязанных между собой.

Впервые численный метод [75] решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, в задаче обтекания трехмерной судовой поверхности вязким потоком применил Б. Спэлдинг и его соавторы из Имперского колледжа Лондона. Б. Спэлдинг долгие годы занимался адаптацией численных методов гидродинамики к прикладному использованию в различных областях техники. В 1978 г. он и его соавторы в целом завершили создание первой коммерческой универсальной СИА PHOENICS и представили результаты решения нескольких сложных инженерных задач, включая обтекание корпуса судна.

Большую роль в формировании современного этапа развития численных методов в судостроении сыграло обсуждение научным сообществом расчетных результатов и сопоставление их с экспериментальными данными, которое впервые состоялось в 1980 г. на международном семинаре по проблемам

численного моделирования обтекания судового корпуса вязким потоком в Гётеборге. В основном были представлены результаты, полученные с помощью панельных методов.

В 1990 г. также в Гётеборге прошел второй семинар, на котором большая часть участников (17 из 19) представила результаты, полученные уже с помощью решения уравнений движения вязкой жидкости (осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса). Была отмечена высокая достоверность получаемой картины потока в кормовой оконечности, достигнутая благодаря более корректному учету вязкости.

По настоящее время семинар проводился каждые пять лет поочередно в Гётеборге и Токио. Ключевым событием четвертого семинара (Гётеборг, 2000 г.) стало предложение об использовании трех судовых корпусов с современной формой обводов, снабженных надежными экспериментальными данными, в качестве стандартных тестов для вычислительных методов. Геометрия корпусов и результаты буксировочных испытаний, включая некоторые образцы визуализации потока, были опубликованы (например, в [92]), и находятся в свободном доступе. Для облегчения сравнения результатов, полученных в разных ПК различными расчетными группами, были предложены стандартные процедуры обработки.

Рекомендованными стали корпуса следующих судов:

1. Танкер KVLCC2, второй вариант корейского VLCC (тип судна, от англ. very large crude carrier – очень крупный перевозчик нефти);
2. Контейнеровоз KCS (от англ. Korean container ship – корейский контейнеровоз);
3. Американский боевой корабль DTMB 5415 (название соответствует шифру модели, испытанной в Опытном бассейне им. Дэвида Тэйлора, англ. David Taylor Model Basin).

Основные характеристики судов представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Основные характеристики эталонных судов

Основные характеристики (масштаб натуры)			KVLCC2	KCS	DTMB 5415
Длина между перпендикулярами		L_{PP} , м	320.0	230.0	142.0
Ширина по ватерлинии		B , м	58.0	32.2	19.1
Осадка		d , м	20.8	10.8	6.15
Водоизмещение		∇ , м ³	312622	52030	8424.4
Площадь смоченной поверхности		S , м ²	27194	9424	2972.6
Коэффициент общей полноты		C_B	0.8098	0.6505	0.507
Расчетная скорость	Скорость	V_{KN} , уз.	15.5	24.0	18.0, 30.0
	Число Фруда	Fr	0.142	0.260	0.248, 0.413

Как видно из табл. 1.1, рекомендованные для тестирования суда по типу обводов и скоростному режиму относятся к разным группам, что позволяет охватить практически весь спектр явлений, сопровождающих обтекание судовых корпусов. Танкер KVLCC2 является тихоходным судном с большой полнотой обводов, его буксировочное сопротивление определяется в основном вихреобразованием и отрывом ПС в кормовой оконечности. Контейнеровоз KCS является типичным представителем морских судов средней быстроходности с умеренной полнотой обводов, при его обтекании существенную роль играет формирование системы корабельных волн. Наконец, корпус корабля 5415 с острыми обводами рассчитан на режим полного хода вблизи максимума волнового сопротивления ($Fr = 0.413$), где большую роль приобретают характеристики динамической посадки, режим экономического хода соответствует $Fr = 0.248$.

Для организации отладки вычислительных методов было сформулировано шесть различных тестовых задач по ходкости и мореходности, включая буксировку с фиксированной и свободной посадкой, самоходные режимы, движение на волнении. Не останавливаясь подробно на особенностях этих задач, рассмотрим общие данные по использованию различных вычислительных методов по результатам семинара «Гётеборг-2010» [93], которые представлены в табл. Б.1 Приложения Б. Каждая организация-участник представила результаты по одной или нескольким задачам. Всего 33 расчетными группами было

представлено 84 результата, из которых 52 по модели KCS, 26 по модели DTMB 5415 и 6 по модели KVLCC2.

Все методы, представленные в табл. Б.1, основаны на решении уравнений Навье-Стокса. Большинство численных методов использует двухпараметрические модели турбулентности (k - ε или k - ω). Реже используются однопараметрические и анизотропные модели. В отдельных случаях применялись модели LES/DES (моделирование отдельных вихрей), и в одном случае даже DNS (прямое моделирование без осреднения по времени). Большинство расчетных групп использовали на корпусе ГУ прилипания, но в некоторых случаях применялись и пристенные функции, как с учетом градиента давления, так и без него. Метод VOF является наиболее востребованной технологией моделирования свободной поверхности, после которой по частоте использования следует метод функции уровня. Только в трех случаях применялся метод отслеживания поверхности. Для решения уравнений жидкости в различных ПК использовались конечно-разностные и конечно-объемные алгоритмы со вторым и третьим порядками точности, в некоторых отдельных случаях – с четвертым порядком. В большинстве методов использовались уравнения несжимаемой жидкости, но в некоторых случаях и полные уравнения вязкой жидкости или уравнения с искусственной сжимаемостью.

В расчетах применялись всевозможные типы сеток: одноблочные и мультиблочные, структурированные и неструктурированные. Число расчетных ячеек в задачах составляло от 0.3 млн. до 300 млн., но большинство исследований было выполнено с сетками размером 1 – 10 млн.

Как видно из представленных данных, современные численные методы имеют общие основы, но характеризуются большим разнообразием схем реализации, охватить которое в настоящем кратком обзоре не представляется возможным. Особенности используемых в настоящей работе методов описаны ниже в разделе 2.

Статистика точности полученных результатов по буксировочному сопротивлению представлена на рис. 1.4, где погрешности показаны в

зависимости от размера расчетной сетки. Как видно из рисунка, около 90% представленных расчетов были выполнены в сетках с числом ячеек менее 10 млн. Основная масса результатов, полученных в сетках с 3 млн. ячеек и более укладываются в поле $\pm 4\%$, причем для больших сеток заметного снижения погрешности не наблюдается. Даже на сетках с размером 300 млн. ячеек не заметно повышения точности, которая остается в тех же пределах. Однако для сеток с размером менее 3 млн. поле погрешностей расширяется до $\pm 8\%$.

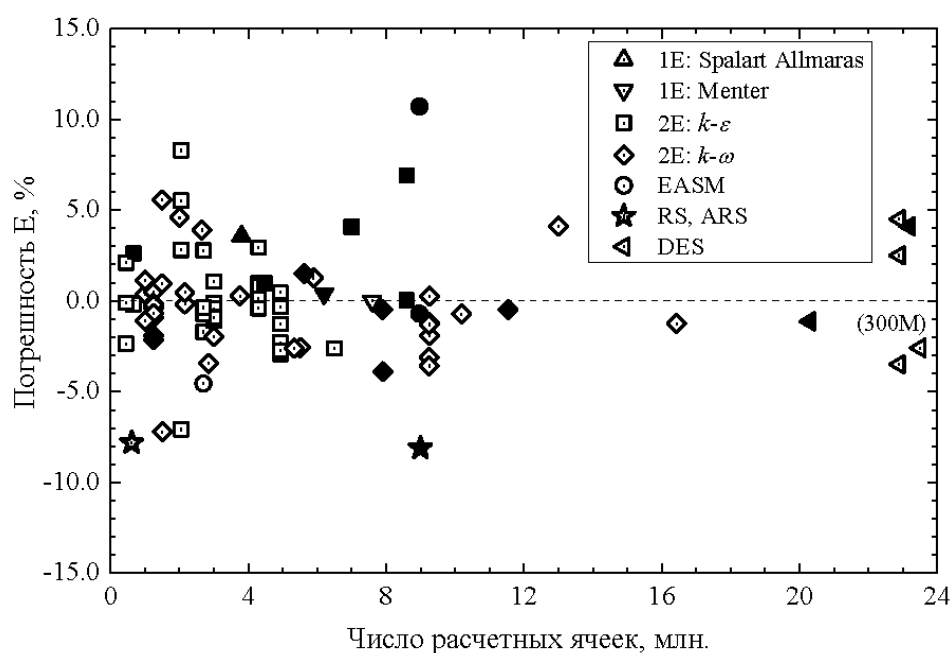


Рисунок 1.4 – Точность численных расчетов с разными моделями турбулентности и размерами сеток

Источник: [93]

Таким образом, точность современных численных методов в задаче определения буксировочного сопротивления можно оценить как несколько меньшую, чем достигается в эксперименте, но уже сопоставимую с ней.

Использование численных методов для оптимизации формы корпуса в современном проектировании осуществляется по принципам экспериментальной отработки обводов – фактически, методом проб и ошибок.

Между тем, численные методы предоставляют определенные практические преимущества: в затратах времени и денежных средств на проведение

исследований – за счет сравнительной доступности программного обеспечения и вычислительной техники по отношению к лабораторным установкам, а также более широких возможностей по модификации формы благодаря использованию виртуальных 3D моделей. Это позволяет значительно увеличить число вариантов, рассматриваемых одновременно. Богатые возможности визуализации потока способствуют более быстрому поиску эффективных решений. Открытым остается вопрос о том, каким образом лучше всего реализовать эти преимущества.

В опубликованной Обществом инженеров-кораблестроителей и морских инженеров (SNAME) в 2010 г. книге по ходкости “Ship Resistance and Flow” [94] имеются рекомендации по проектированию формы корпуса с учетом опыта использования всех современных методов, включая численные. Наибольший интерес представляет глава 11.5 “Detailed Hull Form Improvement – Wave-Making Aspects” [94, с. 181 – 203], где изложены вопросы совершенствования обводов с позиций волнового сопротивления.

При отработке обводов авторы (Л. Ларсон и Х. Равен) предлагают придерживаться некой общей методологии. Фактически в [94] под таковой понимается лишь общая последовательность действий, словесное описание взаимосвязей между распределением давления на корпусе и волновой системой судна, а также ряд рекомендаций по снижению волнового сопротивления, проиллюстрированных примерами.

В описании, посвященном анализу распределения давления по корпусу, содержится интересный тезис о трудностях использования этой информации для выработки конкретных мер по снижению сопротивления. Действительно, если рассмотреть сопротивление как результат перепада сил давления на корпусе, то выгодно уменьшать этот перепад. При этом наибольший перепад наблюдается между кормовой и носовой частями поверхности, что ведет к тривиальному выводу о выгоде снижения гидродинамических сил в носовой части и повышения их в кормовой. Или, что то же самое, о выгоде переноса водоизмещения из носа в корму.

Причины указанных трудностей связаны, во-первых, с подавляющим вкладом вязкостной составляющей в наблюдаемую картину распределения давления. Авторы [94] в качестве примера приводят сравнение распределения давления у дублированной модели и с учетом волнообразования, которые весьма мало отличаются. Вторая причина – нелинейность взаимосвязи между формой и распределением давления. При изменении формы поверхности давление тоже перераспределяется.

В качестве основной информации для снижения волнового сопротивления предлагается использовать не распределение давления по корпусу, а волновую систему на свободной поверхности. Предлагается рассматривать отдельные волны, распространяющиеся от разных участков поверхности. Изменяя эти участки, следует добиваться благоприятной интерференции в общей волновой системе, ориентируясь на формулу Т. Хавелока (1.2). По существу, условие благоприятной интерференции заключается в ослаблении поперечных волн и усилении расходящихся.

Эти положения близки к некоторым теоретическим исследованиям, особенно к выводам Т. Инуи о влиянии элементарных волн. Также можно проследить некоторую общность с теоретическими методами, рассматривающими влияние элементарных изменений судовой поверхности. Разница состоит в том, что в одном случае вначале рассматриваются отдельные волны, а затем участки поверхности, от которых они распространяются, в другом же – исходной является судовая поверхность, для которой рассчитываются вариации интеграла Мичелла (В.Г. Сизов, [60]).

Отсутствие в [94] методов анализа и обобщения результатов по разным вариантам формы, которые бы позволяли делать количественные прогнозы снижения сопротивления в ходе исследования, а также конкретных рекомендаций по величине и характеру изменений формы корпуса, на наш взгляд, не позволяют считать предложенную методологию полноценной. Вместе с тем, ее концепция направлена на более детальную отработку обводов (рассматриваются отдельные локальные участки поверхности) по сравнению с традиционной практикой

экспериментальной отработки. Это соответствует расширенным возможностям численных методов. Характерно, что все приведенные для иллюстрации примеры выполнены с помощью численных методов.

1.3. Постановка задачи

Обоснованным критерием качества формы корпуса представляется минимум удельного сопротивления R/V . В задаче совершенствования формы корпуса удобно использовать локальные значения удельного сопротивления, соответствующие трансформациям различных участков поверхности корпуса. Главные размерения и их соотношения, включая величину водоизмещения, а также контур ДП будем считать неизменными, стараясь по возможности отделять их влияние от влияния собственно формы поверхности корпуса.

Использование теоретических формул для волнового сопротивления влечет за собой ряд нежелательных ограничений, прежде всего, связанных с неучетом влияния вязкости и сложностью задания судовой поверхности в аналитическом виде. В статье [61], анализируя свой способ с современных позиций, В.Г. Сизов указал на возможность применения численных методов для расчета изменений в сопротивлении.

Возможный путь использования численного моделирования выглядит следующим образом:

1. Подготавливаются геометрические модели корпусов, каждый из которых получен из начальной формы прибавлением или вычитанием объема δV_i вблизи i -той точки.
2. Сопротивление всех моделей, включая модель исходного корпуса, рассчитывается с помощью ВГД. Тогда для каждой i -той точки будет получено три результата: $\delta R_i(+\delta V_i)$, $\delta R_i(-\delta V_i)$ и в начальном положении $\delta R_i(0) = 0$.
3. На основе полученных результатов с помощью аппроксимации строятся зависимости $\delta R_i = f(\delta V_i)$, первообразные к вариациям $\lambda = dR_i/dV_i = f'(\delta V_i)$.

Принципиально указанный подход одинаков в случае использования ВГД и модельного эксперимента.

При внешней простоте этот путь имеет весомые практические недостатки, если действительно пытаться задавать изменения в отдельных точках судовой поверхности. Прежде всего, это приводит к исследованию слишком большого числа моделей, которое будет прямо связано с числом рассматриваемых точек.

Другой недостаток связан со сложностью придания конечных приращений объема δV поверхности судовой формы. Объем необходимо сосредоточить в окрестностях точки так, чтобы ее влияние на сопротивление можно было отделять от влияния соседних точек. Поэтому δV будет опираться на площадку судовой поверхности ограниченных размеров, представляющую собой «зону влияния» данной точки, и согласованную с такими же площадками соседних точек. При этом прибавление или вычитание δV не должно вызывать резкого локального изменения характера обтекания. Удовлетворение этих противоречивых требований упирается в проблему обоснования величин δV .

Практическое вычисление производных $\lambda = dR/dV$ требует минимальных приращений объемов δV , так как по определению $\delta V \rightarrow 0$, с одной стороны, и высокой точности оценки величин δR с другой. Точность оценок δR ограничена точностью экспериментального или численного моделирования. На практике совершенно неясно, как следует подходить к выбору δV . Эта проблема является предметом дальнейших исследований специалистов и математиков.

В качестве примера на рис. 1.5 показана площадка, на которую опирается приращение объема у точки А, принадлежащей КВЛ. Из рисунка видны значительные относительные размеры площадки. Однако для сохранения приемлемой общей формы корпуса максимальное поперечное расстояние между начальной и измененной поверхностями в точке А приходится ограничить небольшой величиной. Очевидно, что подобные величины δV находятся за гранью точности обычных экспериментов в опытовых бассейнах, тем более современных методов ВГД.

Судовая поверхность должна удовлетворять всем проектным требованиям, в том числе и не связанным с ходкостью. Многообразие и сложность требований отражается на форме корпуса в виде традиционной общей плавности обводов, которая характерна для судовых форм. Наличие местных выемок или впадин на поверхности, как правило, считается недопустимым или нежелательным.

Еще одна проблема заключается в том, что работа со слишком малыми величинами приращений объема нежелательна из-за узости диапазона оптимизируемых параметров. Это может привести к малой продуктивности алгоритма, при которой для достижения заметного влияния на сопротивление придется использовать большое число последовательных изменений формы.

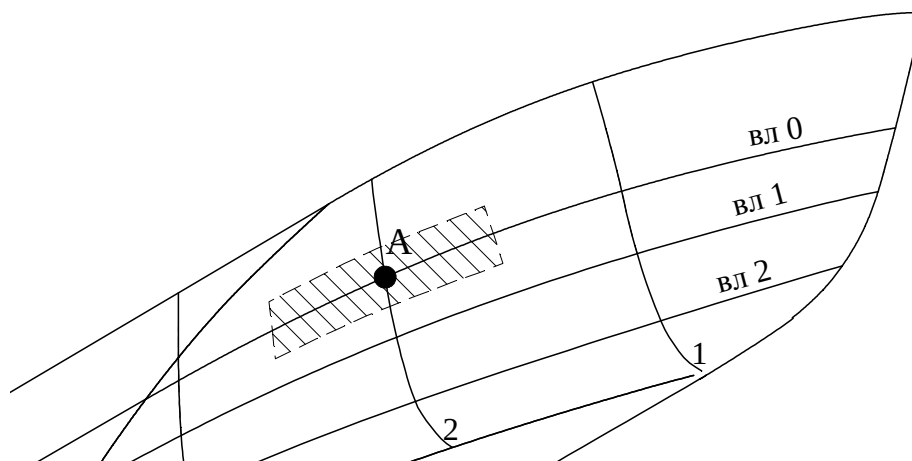


Рисунок 1.5 – Площадка δV вблизи точки А судовой поверхности

Таким образом, работать напрямую с координатами отдельных точек крайне неудобно. При достаточно крупных приращениях водоизмещения, которые нельзя локализовать вблизи отдельных точек поверхности, вместо них удобнее оперировать обобщенными параметрами – элементами теоретического чертежа.

Собственно форму судовой поверхности в наибольшей степени характеризуют параметры продольного и вертикального распределения полноты. Продольное и вертикальное распределения полноты весьма наглядно описываются интегральными кривыми – строевой по шпангоутам и строевой по ватерлиниям. Механизмы их варьирования представляются наиболее подходящей

основой для построения *модели систематических трансформаций* (МСТ) формы корпуса.

Так, за счет модификации строевой по шпангоутам можно изменить объем корпуса на некоторую величину δV . Если такие приращения δV_i локализованы в окрестностях некоторых точек x_i , с этими точками можно соотнести приращения δR_i и выполнить оценку величин λ_i . Аналогично поверхности вариаций в исследовании [60], значения λ_i составляют кривую вариаций, которая отражает выгодность тех или иных изменений в продольном распределении водоизмещения, заданном строевой по шпангоутам. Переход от поверхности вариаций к двумерной кривой объясняется исключением из рассмотрения влияния вертикального распределения полноты, которое требует лишь контроля, так как не имеет оптимума по волновому сопротивлению.

Формализация варьирования геометрии с помощью МСТ представляется совершенно необходимым элементом постановки задачи с использованием ВГД.

С развитием ВГД в различных областях техники стали активно применяться методы оптимизации, основанные на сложных математических алгоритмах. Для иллюстрации этого подхода можно привести пример оптимизации положения элементов механизированного крыла самолета [41].

Геометрия механизированного крыла, состоящего из трех элементов (крыло с предкрылком и закрылком), хорошо поддается формализации – варьируемыми параметрами являются только углы отклонения предкрылка и закрылка относительно профиля крыла. Сформировав критерии и ограничения, оптимизационную задачу можно решить за счет исследования большого числа вариантов положений предкрылка и закрылка (порядка сотен).

Число вариантов, необходимое для нахождения оптимума, существенно зависит от особенностей используемого алгоритма. При простом переборе всех возможных сочетаний параметров (варьируемых с некоторым шагом), оно максимально. Современные методы оптимизации используют адаптивные алгоритмы, которые анализируют промежуточные результаты с целью поиска закономерностей, что сокращает число исследуемых вариантов.

Как правило, такие алгоритмы являются универсальными и не учитывают гидродинамических особенностей задачи. В этом есть свои преимущества и недостатки. Основным преимуществом является простота использования алгоритма, действующего по принципу черного ящика. Недостатком можно считать неэффективность затрат вычислительных ресурсов в тех случаях, когда в ходе решения заново выводятся очевидные физические закономерности.

Применение стандартных методов в задаче оптимизации формы корпуса затруднено, прежде всего, из-за сложности формализации варьирования геометрии. Как отмечено выше, с помощью специально разработанной МСТ, эту проблему можно попытаться преодолеть.

Существует и другая проблема применения универсальных алгоритмов, связанная с весьма высокими требованиями к вычислительным ресурсам, которые характерны для задачи численного моделирования обтекания корпуса в настоящее время. Эти требования таковы, что число исследуемых вариантов важно ограничить величинами порядка десятков.

Уменьшению затрат вычислительных ресурсов может способствовать разработка специального метода снижения сопротивления с учетом физических особенностей задачи. Известно, что наиболее важные процессы при обтекании корпуса судна связаны с волнообразованием, а волновое сопротивление входит в «активное» остаточное сопротивление, которое может изменяться в значительных пределах при изменении формы корпуса [30, с. 415].

1.4. Выводы по разделу 1

По нашему мнению, обзор методов исследований показал, что подход к последовательному совершенствованию формы корпуса, используемый в методе В.Г. Сизова, является одним из наиболее корректных. В более поздних работах, в основном предусматривающих оценку буксировочного сопротивления с помощью экспериментальных или численных методов, не применялась более совершенная методологическая база.

Вместе с тем, методика, позволяющая проводить детальное проектирование судовой поверхности, по настоящее время не разработана. С внедрением в последние годы численных методов в проектную практику ситуация приобрела черты *противоречия* на эмпирическом и теоретическом уровне, поскольку появилась возможность изучения большого числа вариантов формы при наличии мощных средств визуализации и анализа, однако не ясно, по каким принципам следует организовывать исследование и как синтезировать на основе его результатов оптимальную форму корпуса.

На основе анализа состояния проблемы совершенствования судовых обводов сформулирована постановка задачи, которая базируется на:

1. Фиксации неизменных главных размерений и их соотношений, включая величину водоизмещения, а также контура ДП.
2. Критерии удельного сопротивления R / ∇ , применяемом как к корпусу в целом, так и к локальным участкам его поверхности в соответствии с концепцией метода В.Г. Сизова.
3. Трансформациях локальных участков корпуса с помощью МСТ, которые сопровождаются варьированием распределения водоизмещения корпуса;
4. Оценке влияния трансформаций корпуса на его буксировочное сопротивление с помощью ВГД.
5. Поиске оптимальной конфигурации трансформаций корпуса с помощью специально разработанного метода снижения сопротивления.

Принятая постановка задачи отвечает всем требованиям из работы В.М. Пашина [44], приведенным выше на с. 29.

Результаты обзора опубликованы в тезисах апробационного доклада [54].

РАЗДЕЛ 2. МЕТОДЫ ВГД, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В РАБОТЕ

2.1. Программный комплекс

Применение методов ВГД в задачах моделирования ходовых качеств судов в настоящее время осуществляется в основном в рамках специальных ПК (или СИА). В табл. Б.1 Приложения Б представлена информация о ПК, с помощью которых участники международного семинара «Гётеборг-2010» решали тестовые задачи в области ходкости.

В табл. Б.1 можно найти практически все ведущие ПК, которые на серьезном уровне применяются в области ходкости судна в настоящее время во всем мире. Среди перечисленных присутствуют как коммерческие ПК, так и некоммерческие, разрабатываемые академическими и научными организациями.

Все приведенные в табл. Б.1 ПК разработаны за рубежом, в регионах с высоким уровнем развития ВГД и кораблестроительной науки: в странах Западной Европы, США и Японии.

В последние годы в Украине, России и некоторых других странах значительное распространение, в том числе в судостроительных проектных организациях, получил сравнительно новый ПК FLOWVISION [57]. Этот ПК используется Зеленодольским ПКБ, ЦМБК «Алмаз», Николаевским университетом кораблестроения (НУК). Компания Digital Marine Technology является одним из наиболее опытных пользователей в отрасли, используя ПК с 2004 г. для задач гидродинамической отработки обводов и исследования мореходных качеств судов.

ПК FLOWVISION является продуктом российской команды разработчиков, входящей в коллектив инжиниринговой компании ТЕСИС. FLOWVISION позволяет решать широкий круг гидродинамических задач для разных отраслей промышленности. Комплекс основан на методе конечных объемов, который является в настоящее время индустриальным стандартом в ВГД. FLOWVISION имеет возможность расчета как сжимаемых, так и несжимаемых течений

жидкости и газа, содержит пять моделей турбулентности, включая низкорейнольдсовы модели.

Основное отличие FLOWVISION от аналогов – автоматическая генерация расчетной сетки. Обычно в ПК ВГД или прочностного анализа в работе пользователя, связанной с подготовкой моделирования, до 90% времени занимает построение расчетной сетки. В FLOWVISION эта проблема снимается благодаря генерации расчетной сетки с использованием метода подсеточного разрешения геометрии (адаптивная локально измельченная сетка или АЛИС). Суть этого метода [72] заключается в булевом вычитании из декартовой расчетной сетки объема, заданного замкнутой поверхностью, ограничивающей расчетную область. При этом ячейки расчетной сетки, через которые проходит криволинейная поверхность расчетной области, превращаются в сложные многогранники, внутри которых проводится аппроксимация решаемых уравнений схемой высокого порядка точности. Уточнение решения в областях с высокими градиентами характеристик течения и около границ достигается динамической адаптацией расчетной сетки (делением соответствующих ячеек расчетной области на более мелкие ячейки).

При моделировании турбулентного обтекания судна водой или воздухом используется подход URANS, основанный на решении нестационарных уравнений движения жидкости и двухпараметрической модели турбулентности типа k - ϵ [37]. Для расчета свободной поверхности жидкости применяется модифицированный метод определения объема жидкости в ячейке (VOF). Важным преимуществом FLOWVISION при решении задач гидродинамики судна является возможность одновременного расчета перемещения подвижных тел и свободной поверхности.

В целом ПК FLOWVISION, являясь сравнительно новым программным продуктом (в судостроении используется с начала 2000-х), в настоящее время обладает всеми основными технологиями, которые используются в ведущих ПК. FLOWVISION также имеет свои уникальные преимущества – прежде всего, это технология расчетной сетки АЛИС, а также современный Windows-интерфейс.

При этом интерфейс и документация во многом соответствуют советской научной традиции. Этими причинами объясняется выбор ПК FLOWVISION для использования в рамках настоящей работы.

Как уже отмечено выше, результаты тестирования ПК FLOWVISION не были представлены на семинаре «Гётеборг-2010», а также на более ранних семинарах по проблемам численного моделирования обтекания судового корпуса вязким потоком. Однако в 2013 г. автором были представлены [52, 53] результаты тестирования ПК FLOWVISION в задаче моделирования обтекания судна KCS, выполненного в соответствии с правилами и рекомендациями семинара. Тестирование осуществлялось с использованием методики численного моделирования обтекания корпуса, разработанной в рамках настоящей работы. Его результаты подробно рассмотрены ниже в подразделе 2.3. Полученные в ПК FLOWVISION погрешности соответствуют уровню современных аналогов.

2.2. Разработка методики численного моделирования обтекания корпуса

Для численного решения гидродинамической задачи важны не только технологии и физические модели, реализованные в используемом ПК, но, в не меньшей степени, важна и методика подготовки и выполнения расчета. Методика включает рекомендации по формированию физической модели проекта, подготовке геометрии расчетной области (РО) и объектов моделирования, заданию исходных данных, построению расчетной сетки, назначению ГУ, обработке результатов и другим мероприятиям, которые обеспечивают получение корректных результатов с учетом особенностей рассматриваемой задачи и ПК, в котором она решается.

Для выполнения численного моделирования обтекания судового корпуса с целью получения его сопротивления и других буксировочных характеристик в ПК FLOWVISION была разработана специальная методика создания и расчета проекта, которая включает рекомендации по следующим действиям:

1. Формирование физической модели проекта;

2. Постановка задачи численного моделирования;
3. Контроль выполнения расчета.

2.2.1. Формирование физической модели проекта

Для моделирования обтекания корпуса судна в ПК FLOWVISION целесообразно использовать модель несжимаемой жидкости на основе уравнений Рейнольдса, которая в настоящее время чаще всего применяется в задачах подобного класса. Уравнение Рейнольдса, как известно, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla(V \otimes V) = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla \left((\mu + \mu_t) (\nabla V + (\nabla V)^T) \right), \text{ где:} \quad (2.1)$$

V – скорость;

t – время;

∇ – оператор Гамильтона, $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{k}$;

$\otimes$ – тензорное произведение, $\mathbf{a} \otimes \mathbf{b} \rightarrow \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 b_1 & a_1 b_2 & a_1 b_3 \\ a_2 b_1 & a_2 b_2 & a_2 b_3 \\ a_3 b_1 & a_3 b_2 & a_3 b_3 \end{bmatrix}$;

p – давление;

μ – молекулярная вязкость;

μ_t – турбулентная динамическая вязкость.

Уравнение (2.1) в модели несжимаемой жидкости дополняется уравнением неразрывности:

$$\nabla V = 0. \quad (2.2)$$

Для моделирования свободной поверхности в ПК FLOWVISION реализован модифицированный метод VOF. В методе VOF используется функция заполнения F . В ячейках сетки, полностью занятых жидкостью, $F = 1$; в ячейках, полностью занятых газом, $F = 0$. Граница раздела фаз соответствует значению $F = 0.5$. Уравнение переноса F имеет вид:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + V \nabla F = 0. \quad (2.3)$$

Значительное упрощение, которое дает уравнение Рейнольдса (2.1) по сравнению с классическим уравнением Навье-Стокса, достигается за счет использования в нем величины турбулентной динамической вязкости μ_t . Для определения этой величины во взаимосвязи с другими характеристиками потока применяются модели турбулентности разного типа и уровня сложности: однопараметрические, двухпараметрические линейные и квадратичные, анизотропные и т.д.

В задачах обтекания судового корпуса чаще всего используются линейные двухпараметрические модели. В настоящей работе также использовалась модель этого типа – стандартная k - ε модель, согласно которой:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (2.4)$$

Величины турбулентной энергии k и скорости ее диссипации ε определяются согласно выражениям:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(V_k) = \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \mu_t) \nabla k) + \frac{G}{\rho} - (\varepsilon - \varepsilon_{ini}), \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(V_\varepsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \mu_t) \nabla \varepsilon) + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_1 \frac{G}{\rho} - C_2 (\varepsilon - \varepsilon_{ini}) \right). \quad (2.6)$$

В выражениях (2.4) – (2.6):

ε_{ini} - начальное значение ε , скорости диссипации турбулентной энергии;

$$G = (\mu + \mu_t) \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right);$$

$C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$ – эмпирические параметры.

Стандартная k - ε модель считается относительно простой и хорошо изученной, ее преимущество заключается в стабильной и адекватной работе на сетках, имеющих большой разброс размеров ячеек. В условиях безотрывного обтекания, при полностью турбулентном режиме ПС использование k - ε модели, как правило, позволяет получать надежные результаты. Эти условия соответствуют режиму обтекания судовых корпусов в масштабе природы и при достаточно крупном модельном масштабе в большинстве случаев.

Во многих случаях при моделировании буксировки судна необходимо учитывать влияние свободной посадки под действием гидродинамических сил. Для обеспечения соответствующих условий в численных расчетах используется технология фильтра подвижного тела ПК FLOWVISION [79, с. 133, 325]. Технология подвижного тела реализует модель тела с шестью степенями свободы, заданного геометрическим объектом. При моделировании свободной посадки в буксировочном испытании используется две степени свободы – движения вдоль вертикальной оси и вращения вокруг поперечной горизонтальной оси.

Важная особенность данной технологии заключается в необходимости перестроения расчетной сетки вблизи поверхности корпуса на каждой итерации. Несмотря на дополнительные затраты вычислительных ресурсов, обеспечивается достаточно высокая эффективность за счет применения в ПК FLOWVISION прямоугольной АЛИС.

2.2.2. Постановка задачи численного моделирования

Моделирование буксировочных испытаний судов численными методами рационально выполнять по схеме гидротка, в котором модель судна обтекается обращенным потоком жидкости. Это обеспечивает близкое к постоянному относительное положение РО с сеткой и объекта, что позволяет использовать сравнительно небольшую РО. Критерием для выбора ее минимальных размеров является отсутствие влияния границ на получаемые результаты.

Численное моделирование можно выполнять сразу в масштабе натуре. Однако в тех случаях, когда есть возможность сравнить полученные результаты с данными модельного эксперимента, рекомендуется готовить численные расчеты также и в модельном масштабе. Это позволяет исследовать возможные проявления масштабного эффекта.

Геометрия РО представляет собой прямоугольный параллелепипед, разбитый на грани в соответствии со схемой расстановки ГУ – рис. 2.1. В тех случаях, когда обводы корпуса симметричные, можно моделировалась половину потока.

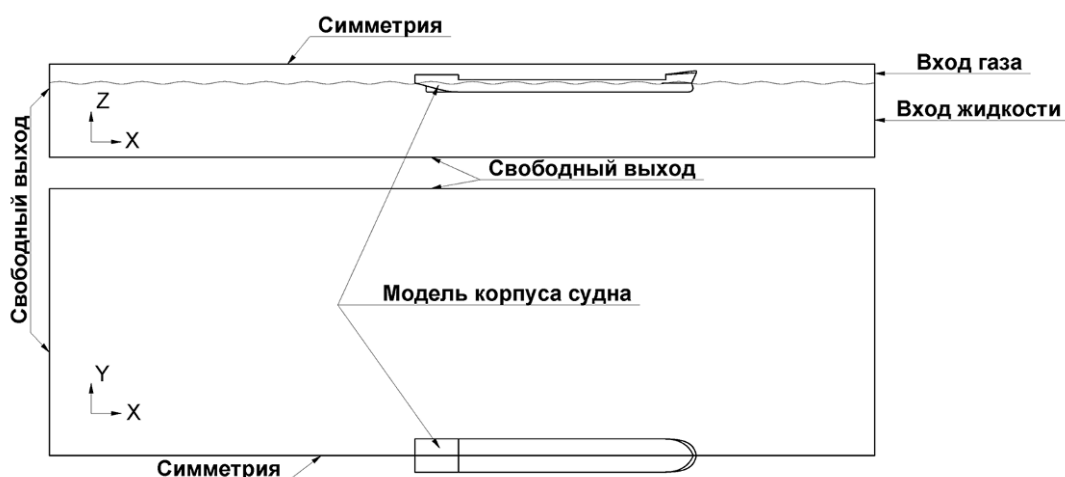


Рисунок 2.1 – РО и расстановка ГУ

Назначение поперечных размеров РО в первом приближении может быть выполнено с использованием рекомендаций (например, из [70]) об отсутствии влияния мелководья и ограничения ширины фарватера на сопротивление судов.

Согласно этим рекомендациям, для обеспечения отсутствия заметного влияния мелководья на сопротивление глубина воды h должна одновременно удовлетворять двум условиям:

$$\frac{h}{d} \geq 7 \text{ и } Fr_h = \frac{V}{\sqrt{gh}} \leq 0.5.$$

Для обеспечения полного отсутствия влияния ограниченности фарватера его ширина должна быть в 20 больше ширины корпуса ($20B$). Это ограничение во многих случаях, вероятно, избыточно строгое, так как влияние боковых стенок существенно зависит от Fr . Для тихоходных судов безопасная ширина фарватера может быть значительно меньше.

Как видно из рис. 2.1, на боковых стенках, а также на дне РО предусмотрено ГУ типа «свободный выход». ГУ этого типа в общем случае снижают влияние границ области на течение в ее центральной части и вносят меньше искажений в поток по сравнению с обычной стенкой (в обращенном потоке моделируется с помощью ГУ симметрии). ГУ свободного выхода включает условие нулевого давления на стенке и нулевого потока других переменных через нее. По этим причинам можно ожидать, что рекомендации по

глубине и ширине фарватера на основе экспериментальных данных, возможно, являются завышенными для постановки численного расчета.

Влияние ширины РО на буксировочное сопротивление исследовалось автором. Было выполнено моделирование обтекания полного тихоходного судна в областях с шириной, соответствующей $8B$ и $16B$. Выполненные расчеты показали, что ширина РО практически не влияет на силу буксировочного сопротивления. На рис. 2.2 показана визуализация свободной поверхности при разной ширине РО при $Fr = 0.175$, на рис. 2.3 – зависимость силы сопротивления на корпусе от расчетного времени (показан участок, где сила уже стабилизировалась).

Все же при небольшой ширине РО клин Рэлея достигает боковой границы, и корабельные волны интенсивно с ней взаимодействуют. Это может привести к нежелательным схемным эффектам – например, нефизичным скачкам скоростей и давлений у границы. При ширине РО $16B$ и более клин Рэлея достигает выхода раньше, чем боковой границы. По этим причинам, учитывая относительно небольшую разницу в числе расчетных ячеек, которая находится в пределах 20%, можно сделать вывод о целесообразности расчетов в широких РО, примерно соответствующих экспериментальным рекомендациям.

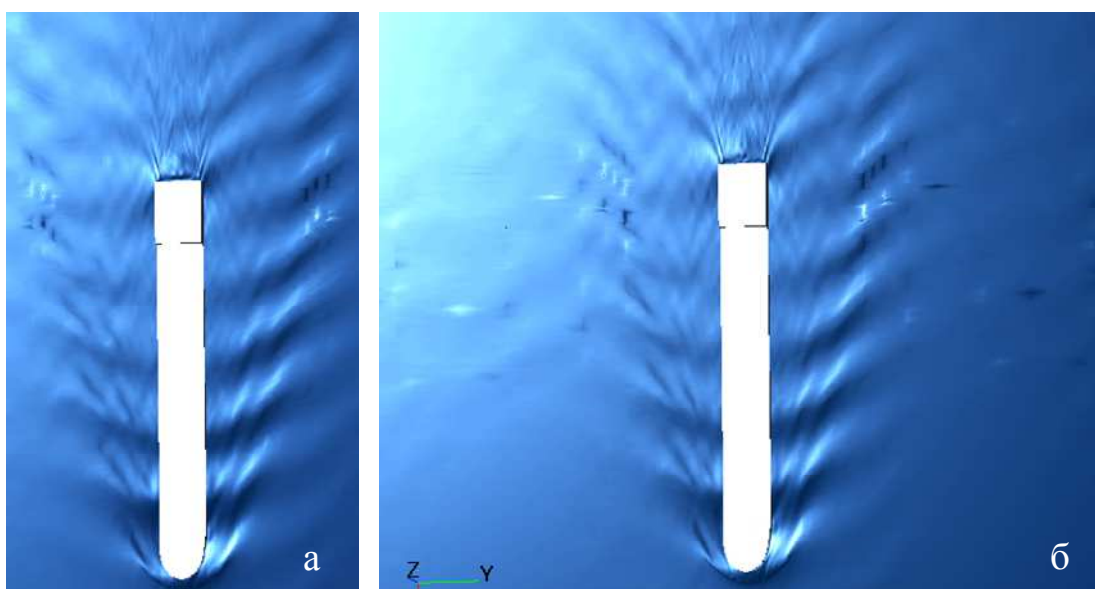


Рисунок 2.2 – Корабельные волны в РО шириной: а – $8B$, б – $16B$

Размеры РО по длине могут быть назначены по следующим соображениям. Расстояние от носовой части модели до входной грани РО должно обеспечивать

отсутствие сильного возмущения, распространяющегося вверх по потоку от модели корпуса, вблизи ГУ входа жидкости. По опыту численного моделирования обтекания судовых корпусов, для выполнения этого условия длина участка РО перед моделью судна l_F должна составлять:

$$l_F \geq 10\sqrt{Bd} . \quad (2.7)$$

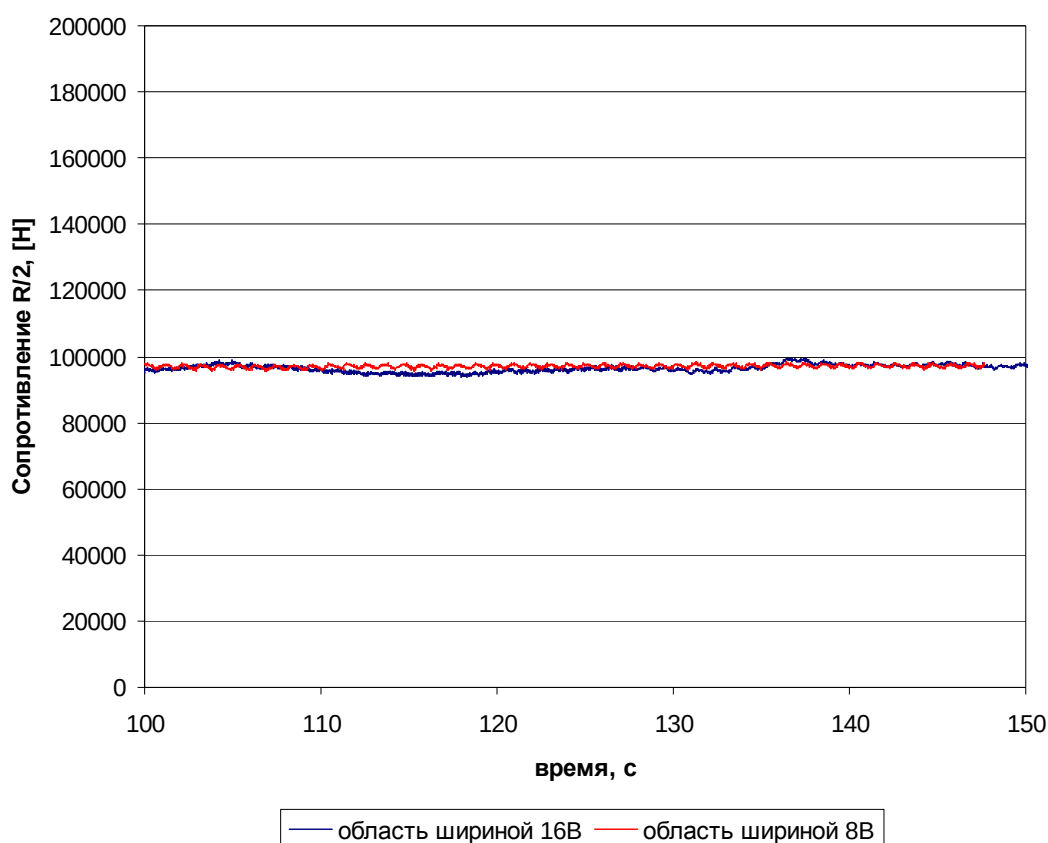


Рисунок 2.3 – Сопротивление корпуса при разной ширине РО

Длина участка РО от кормовой части модели корпуса до выхода должна обеспечивать отсутствие сильных возмущений свободной поверхности, вызванных наличием корабельных волн, у выходного ГУ, которые могли бы отразиться обратно в область и повлиять на обтекание модели. По опыту, для выполнения этого условия длина участка РО за моделью судна l_A должна быть не менее длины модели судна L .

Для возможности учета свободной посадки модель корпуса нужно загружать в расчет как отдельный геометрический объект, на основе которого затем создавать модификатор подвижного тела. В расчетах, где требуется

моделировать свободную посадку, подвижному телу следует назначить две нужные степени свободы и соответствующие им массово-инерционные характеристики. На поверхности модификатора используется ГУ стенки с логарифмическим законом для скорости, которое хорошо отвечает полностью развитому турбулентному ПС. Выбор пристенной функции объясняется тем, что при испытаниях моделей используются методы искусственной турбулизации потока [27, с. 208], а в натурных условиях турбулентный режим в ПС сразу устанавливается из-за высоких Re .

Исходными данными в расчетах являются: ускорение силы тяжести g , скорость буксировки V , плотность ρ и вязкость ν воды.

Технология АЛИС сводит формирование расчетной сетки к построению начальной сетки и, при необходимости, заданию зон локального измельчения (адаптации) в объемах и на поверхностях. Наиболее сложная и трудоемкая часть работы, связанная с построением ячеек, которые соприкасаются с ГУ на поверхностях, выполняется автоматически.

Вообще говоря, размеры ячеек сетки и их общее число нельзя рассматривать как некие абсолютные характеристики. Численные алгоритмы, как правило, содержат компоненты с противоречивыми требованиями к размерам ячеек. Такая ситуация объясняется продолжающимся интенсивным развитием вычислительной техники.

Для получения адекватных результатов на грубых сетках в алгоритмы активно включались вспомогательные упрощенные модели (например, с использованием подсеточных технологий). С ростом вычислительных возможностей доступные размеры сеток растут, и для реализации их преимуществ алгоритмы приходится корректировать, избавляясь от упрощенных моделей или заменяя их более точными. Поэтому рекомендации, касающиеся размеров ячеек, актуальны лишь на ограниченном промежутке времени. Например, общее число расчетных ячеек сетки в задачах моделирования обтекания судна с помощью ПК FLOWVISION за 10 лет увеличилось в среднем в

10 раз – со 100 – 300 тыс. до 1 – 3 млн. и более. При этом общие принципы построения сеток практически не изменились.

Расчетная сетка для моделирования обтекания судна строится на основе прямоугольной неравномерной начальной сетки. Неравномерность размеров ячеек используется для лучшего разрешения важных участков потока. Наиболее мелкие ячейки начальной сетки выгодно группировать у оконечностей судна, где наблюдаются максимальные перепады давления, а также в районе свободной поверхности, где формируется система корабельных волн. Расчетная сетка, которая использовалась для моделирования эталонного судна KCS, показана на рис. 2.4. Внутри бокса адаптации каждая ячейка дополнительно разбита на восемь равных частей (первый уровень адаптации). Число расчетных ячеек сетки составляет около 3.7 млн.

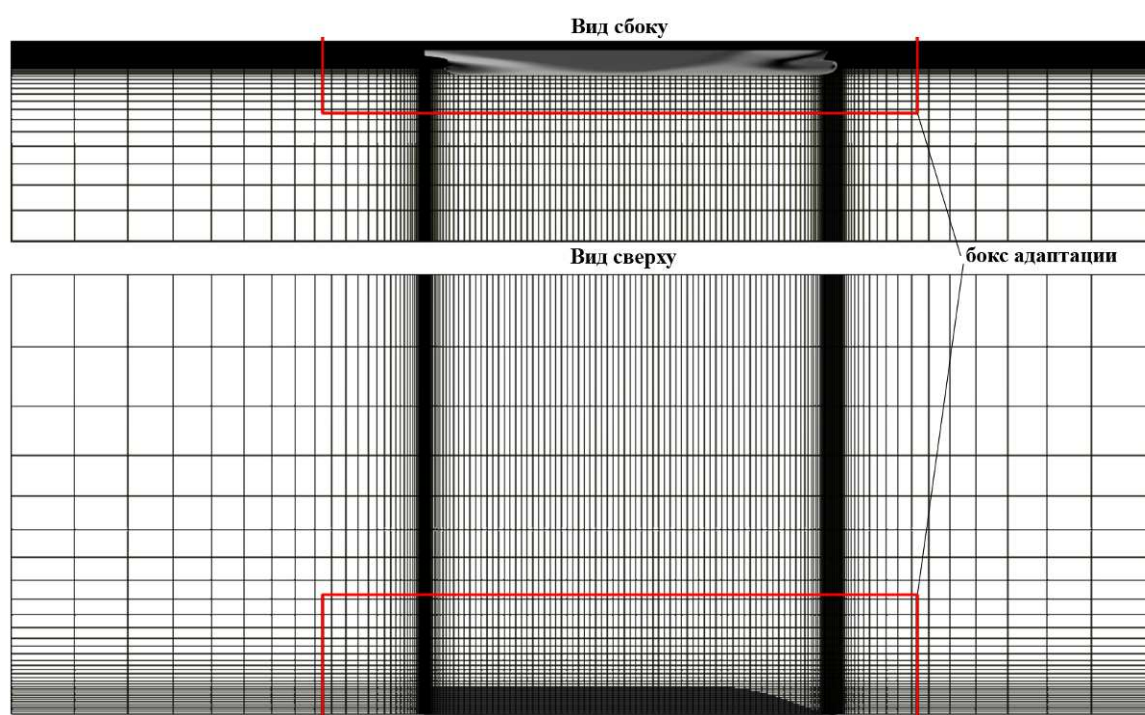


Рисунок 2.4 – Сетка для моделирования обтекания корпуса судна KCS

Применительно к рассматриваемой задаче, измельчение в объеме фильтра (например, прямоугольного бокса), охватывающего область вблизи модели корпуса с участком свободной поверхности, удобно использовать для разрешения перепадов давления в потоке и системы корабельных волн. Опыт расчетов показал, что при безотрывном обтекании судового корпуса (или при отрыве с

фиксированными границами – на кормовом транце) и достаточно больших Re ПС не требует дополнительного детального разрешения и достаточно хорошо описывается пристенными функциями, включенными в состав ГУ на корпусе. Важно лишь обеспечить размеры пристенных ячеек, примыкающих к поверхности корпуса, при которых значения величины y^+ (локальное Re , рассчитанное через размер ячейки по нормали к стенке) допускают корректную работу пристенных функций. Для стандартной k - ε модели турбулентности рекомендуются величины $y^+ < 30000$.

Выбор параметров расчетной сетки, обеспечивающих баланс между точностью и затратами вычислительных ресурсов в данной задаче, представляет собой одну из краеугольных проблем ВГД. При наличии опыта параметры сетки можно успешно выбирать, ориентируясь на особенности геометрической формы объектов. В идеале материалом для выбора параметров сетки являются особенности разрешаемого потока, которые связаны с геометрией объекта, но связь эта бывает сложной и нелинейной. Поэтому в ответственных случаях применяется проверка сходимости по сетке, то есть опытная проверка влияния параметров сетки на точность результатов. На рис. 2.5 представлены результаты таких проверок, выполненных для контейнеровоза KCS и полного тихоходного судна смешанного плавания (ССП) при одной из расчетных скоростей.

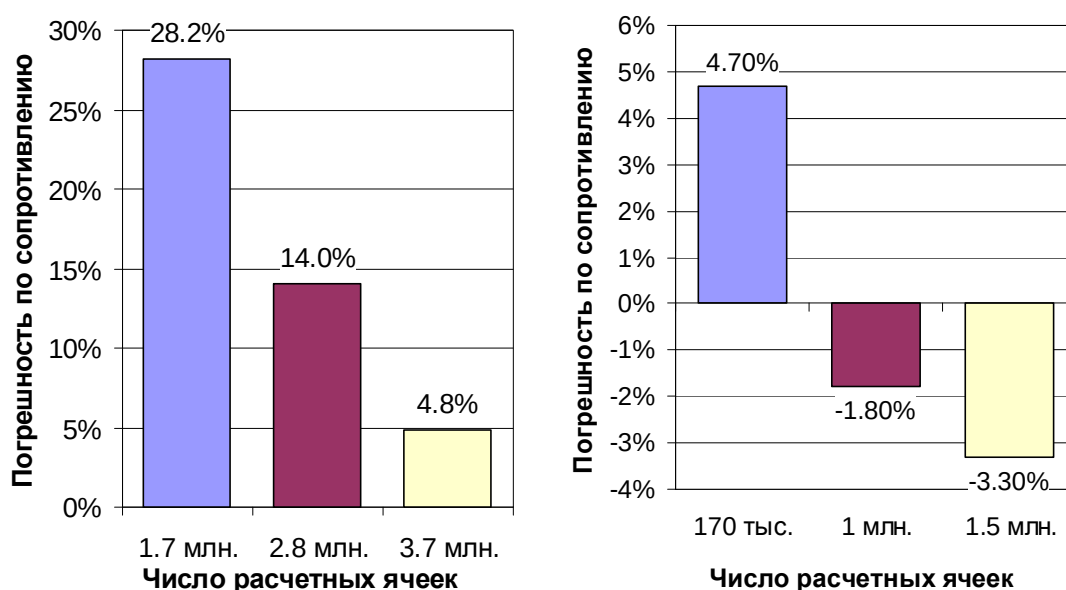


Рисунок 2.5 – Сходимость по сетке: слева для KCS, справа для ССП

В задачах со свободной поверхностью использование сеток с числом расчетных ячеек порядка 1 – 4 млн. обуславливает высокие требования к вычислительным ресурсам. Выполнение расчетов в практически приемлемые сроки становится возможным только за счет параллельных вычислений на суперкомпьютерах.

2.2.3. Контроль выполнения расчета

Начальный период расчета обтекания судового корпуса обычно сопровождается значительными по интенсивности нестационарными явлениями, обусловленными начальными условиями (скорость набегающей жидкости в начальный момент времени равна скорости буксировки, которая может быть достаточно высокой). Поэтому расчет рекомендуется начинать с небольшим шагом по времени, заданным параметром КФЛ [79, с. 149] 1 – 3, который после угасания нестационарных явлений можно увеличить до 3 – 5. По тем же причинам расчеты, в которых предусмотрено моделирование свободной посадки, рекомендуется начинать с фиксированным положением корпуса, а движение корпуса под действием гидродинамических сил включать лишь после окончания начального периода нестационарности.

Контроль выполнения расчета обтекания судового корпуса удобно осуществлять с помощью зависимости силы буксировочного сопротивления на корпусе от расчетного времени – рис. 2.6.

Как видно из рис. 2.6, изменения силы буксировочного сопротивления в процессе расчета дают хорошее представление об этапах, которые проходит обтекающий корпус поток до достижения квазистационарного состояния (на рис. 2.6 наступает примерно после 60-й секунды). При моделировании свободной посадки корпуса зависимость буксировочного сопротивления от расчетного времени можно дополнить аналогичными зависимостями для аппликаты центра вращения и угла дифферента.

Решение о завершении расчета можно принимать, ориентируясь по зависимости буксировочного сопротивления от расчетного времени. При появлении квазистационарного участка, достаточно протяженного для осреднения

силы на корпусе, и при отсутствии сомнений в дальнейших ее значительных колебаниях может быть принято решение о завершении расчета.

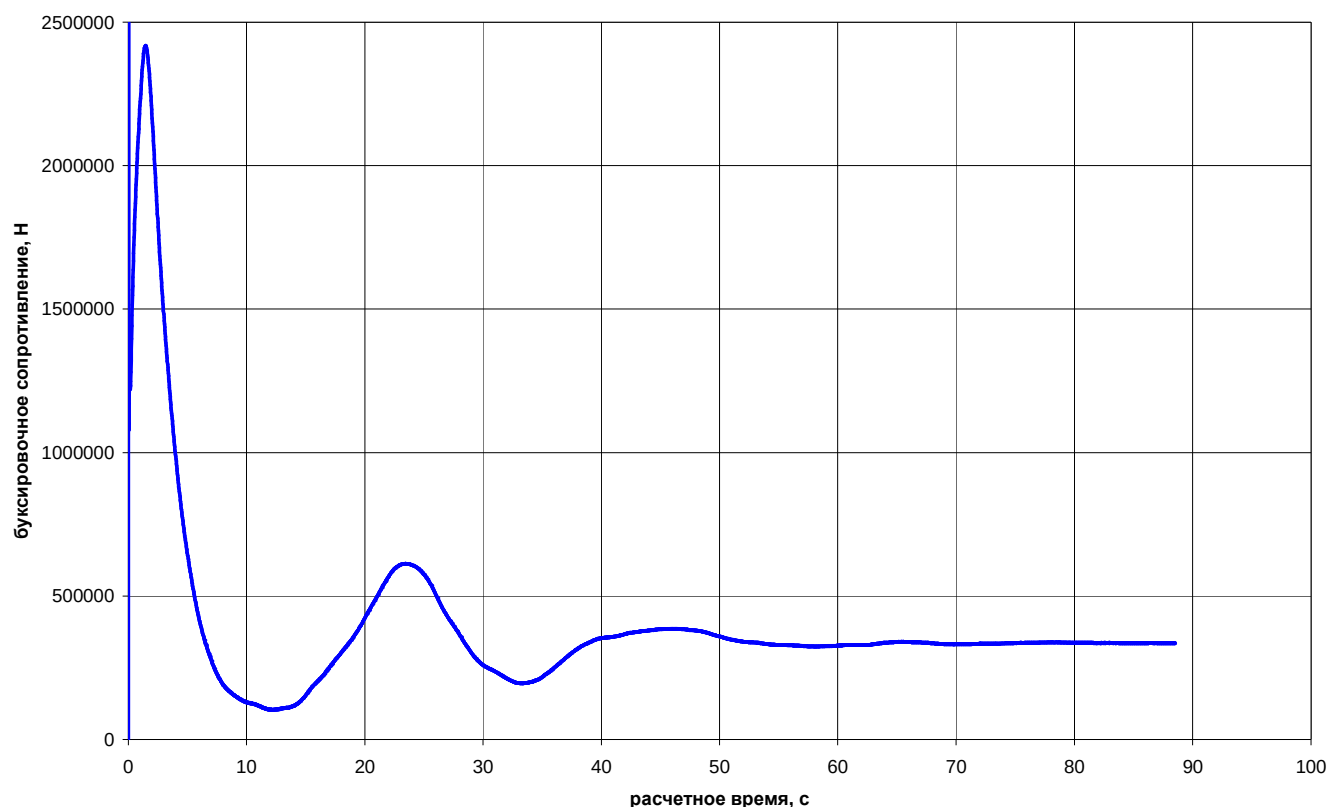


Рисунок 2.6 – Зависимость буксировочного сопротивления от расчетного времени

Если квазистационарный участок не формируется, и колебания силы сопротивления не угазуют, это, как правило, означает, что в потоке образовалось устойчивое возмущение. Причиной могут быть как схемные эффекты, связанные с просчетами в постановке или ошибками ПК, так и неочевидные физические эффекты, вытекающие из постановки. Для нахождения причин посторонних возмущений необходимо, прежде всего, проанализировать с помощью средств визуализации структуру потока и локализовать нежелательные эффекты.

2.3. Результаты численного моделирования эталонных судов

Для тестирования методики численного моделирования обтекания корпуса судна в рамках работы было выполнено моделирование эталонных судов: судна KCS, предложенного на международном семинаре «Гётеборг-2000», а также полного и тихоходного судна смешанного плавания, по которому имеются

надежные экспериментальные данные. Полученные результаты послужили базой для дальнейшего исследования задачи совершенствования формы корпуса.

2.3.1. Результаты численного моделирования KCS

Корпус KCS был спроектирован в Корейском исследовательском институте судов и океанотехники (MOERI, ранее KRISO) в 1997 году специально для тестирования вычислительных методов. В основу задания на проектирование была положена концепция магистрального контейнеровоза для тихоокеанских контейнерных линий.

Носовая часть судна бульбообразная, кормовая часть – транцевая традиционного типа, рассчитанная на установку одновального движительного комплекса.

Основные элементы теоретического чертежа (главные размеры) в масштабах модели и натуре представлены в табл. 2.1. Теоретический чертеж представлен в Приложении В на рис. В.1 и рис. В.2.

Таблица 2.1 – Главные размеры KCS

Характеристики объекта	Натура	Модель (М 1:31.6)
Длина между перпендикулярами L_{PP} , м	230.0	7.2786
Ширина B , м	32.2	1.0190
Высота борта D , м	19.0	0.6013
Осадка d , м	10.8	0.3418
Водоизмещение объёмное ∇ , м ³	52030	1.6490
Площадь смоченной поверхности S , м ²	9424	9.4379
Коэффициент общей полноты C_B	0.651	
Относительная абсцисса ЦВ L_{CB} (%), в нос «+»	-1.48	

В опытовом бассейне MOERI были выполнены буксировочные испытания, в результате которых получены данные по сопротивлению, параметрам ходовой посадки и локальным характеристикам потока. Также были выполнены самоходные испытания, которые послужили базой для соответствующих

тестовых задач. В настоящей работе рассмотрены только задачи, связанные с буксировкой модели голого корпуса (без руля). Согласно рекомендациям семинара, численное моделирование было выполнено в масштабе модели.

По буксировке модели KCS сформулировано два типа тестовых задач – с моделью, закрепленной в статическом положении, и со свободной посадкой модели. Для закрепленной модели предусмотрены две задачи: 2.1 – сравнение визуальной информации по волновой системе и скоростям в потоке, и 2.2а – сравнение величин буксировочного сопротивления.

Сравнение визуальной информации в форме, принятой в задаче 2.1, для волновых профилей на поверхности корпуса представлено на рис. 2.7, для изолиний уровня свободной поверхности – на рис. 2.8 (система координат соответствует данным семинара «Гётеборг-2000» [92]).

Расчетные данные на рис. 2.7 в целом хорошо совпадают с экспериментальными, хотя имеются разнонаправленные местные расхождения.

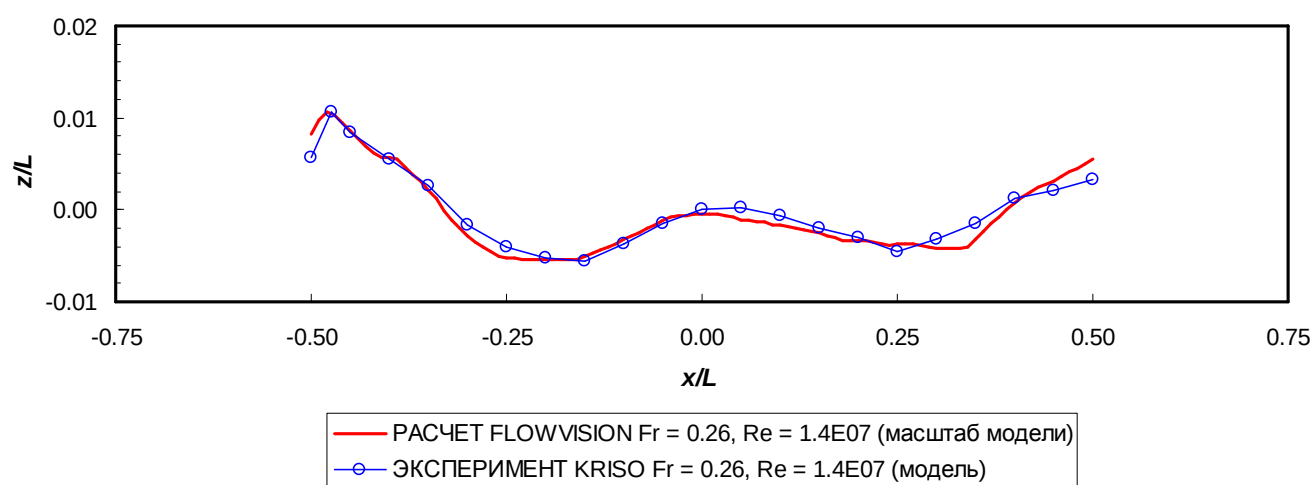


Рисунок 2.7 – Волновой профиль на поверхности корпуса KCS

На рис. 2.8 можно видеть хорошее совпадение вблизи модели судна, но большие расхождения на удалении от нее. Эти расхождения объясняются, прежде всего, ограниченной зоной адаптации сетки вокруг модели. На границе бокса адаптации, которая показана на рис. 2.4 и рис. 2.8, из-за скачка в размерах соседних ячеек, в моделируемый поток вносятся существенные возмущения. Несмотря на эти несоответствия, сетка, ориентированная на разрешение потока

вблизи модели, позволяет получить высокую точность по буксировочному сопротивлению. Результаты расчетов буксировочного сопротивления в виде коэффициентов остаточного сопротивления C_R и полного сопротивления C_T при $Fr = 0.26$ представлены в табл. 2.2.

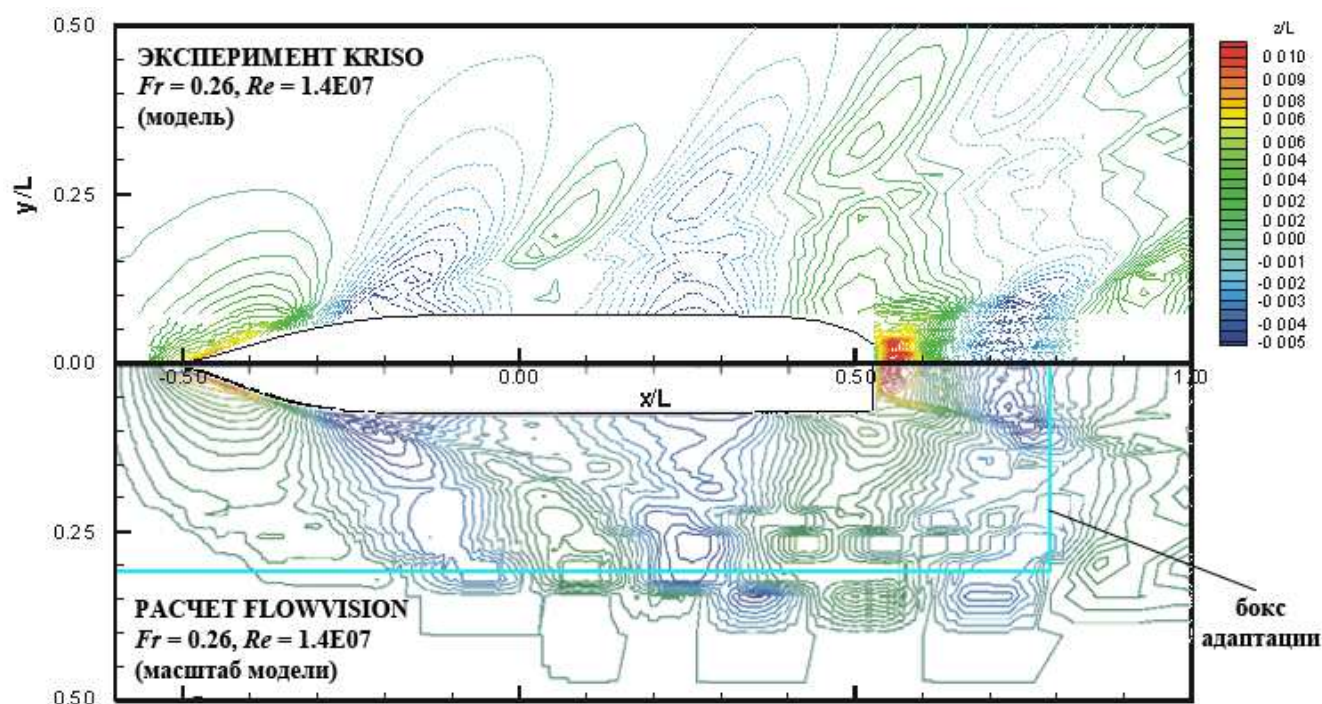


Рисунок 2.8 – Изолинии уровня свободной поверхности

Результаты сравнения данных по буксировочному сопротивлению и параметрам ходовой посадки в широком диапазоне скоростей буксировки (случай 2.2b) представлены в табл. 2.3, а также в графической форме на рис. 2.9 и рис. 2.10.

Сравнение показало высокую точность по буксировочному сопротивлению при $Fr > 0.26$ и заметное завышение расчетных данных при низких Fr . Одной из причин завышения представляется особенность расчетной сетки, которая была построена с учетом максимальных амплитуд корабельных волн, наблюдаемых при высоких Fr . Очевидно, что при меньших амплитудах часть подробной сетки не использовалась, и происходило определенное снижение точности расчетов. Для исключения влияния этого фактора необходимо готовить индивидуальную сетку для каждого Fr , что, однако, требует больших затрат времени.

Таблица 2.2 – Сопротивление закрепленной модели KCS

Эксперимент KRISO		Расчет FLOWVISION		Расхождение в C_T , %
$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	E
0.7294	3.5600	0.7549	3.5855	+0.7%

Таблица 2.3 – Сопротивление модели KCS со свободной посадкой

Число Фруда	Эксперимент KRISO		Расчет FLOWVISION		Расхождение в C_T , %
Fr	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	E
0.1733	0.4650	3.4997	0.6169	3.6517	+4.3%
0.1949	0.4500	3.4232	0.7501	3.7233	+8.8%
0.2166	0.4800	3.3998	0.6744	3.5942	+5.7%
0.2382	0.5780	3.4506	0.8214	3.6940	+7.1%
0.2599	0.8320	3.6626	0.9109	3.7415	+2.2%
0.2707	1.1460	3.9572	1.2905	4.1017	+3.7%
0.2816	1.6600	4.4528	1.5880	4.3807	-1.6%
Средняя погрешность					+4.3%

Сложнее объяснить разницу в точности при $Fr = 0.26$ между фиксированной (задача 2.2а) и свободной (задача 2.2b) посадками. В первом случае погрешность составила +0.7%, во втором +2.2%. Простое объяснение, связанное с неточностью численного моделирования свободной посадки, было исключено после дополнительной проверки. Проверка заключалась в расчете модели, закрепленной в положении, которое точно соответствует экспериментальным замерам. В результате не было выявлено существенной разницы в величине сопротивления. Очевидно, в данном случае на точность повлияли другие факторы – например, отличия в расчетной сетке вблизи поверхностей моделей из-за их разного положения относительно начальной сетки.

Результаты численного моделирования KCS показали, что при подробных расчетных сетках можно получать вполне адекватные значения буксировочного сопротивления и визуализацию потока вблизи объекта исследования, отличающуюся большой детализацией – рис. 2.11. Относительная погрешность

расчетных результатов по отношению к экспериментальным составила +0.7% для модели, закрепленной в начальном положении (одна точка по Fr), и +4.3% для модели со свободной посадкой (средняя погрешность по диапазону $0.17 \leq Fr \leq 0.28$).

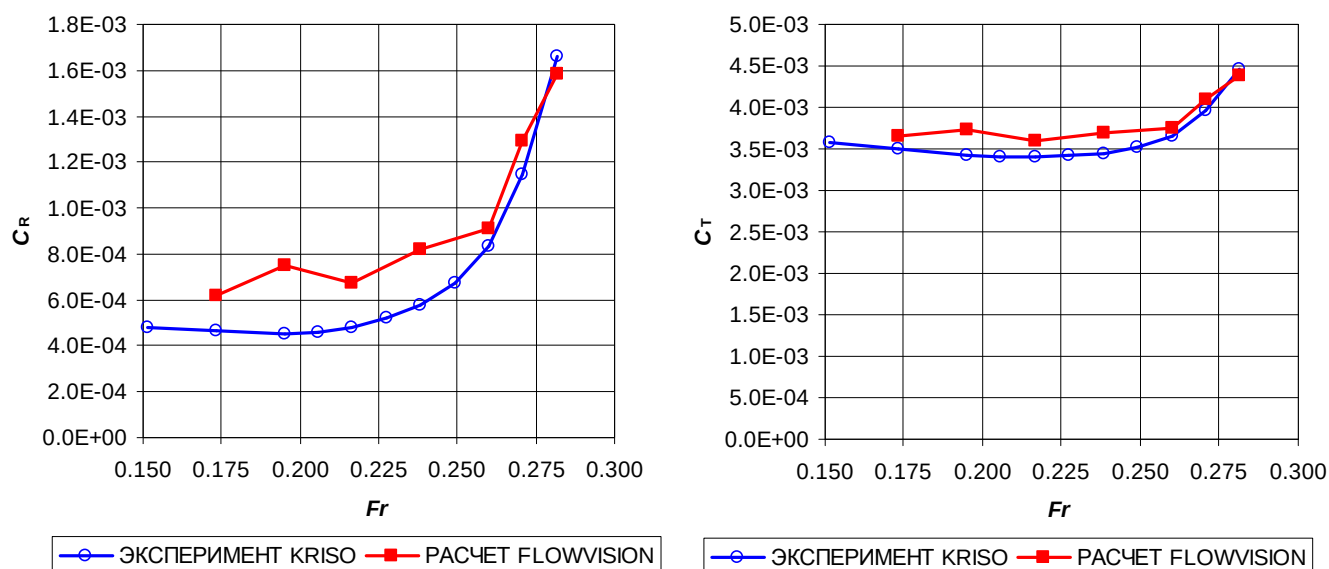


Рисунок 2.9 – Кривые коэффициентов сопротивления KCS

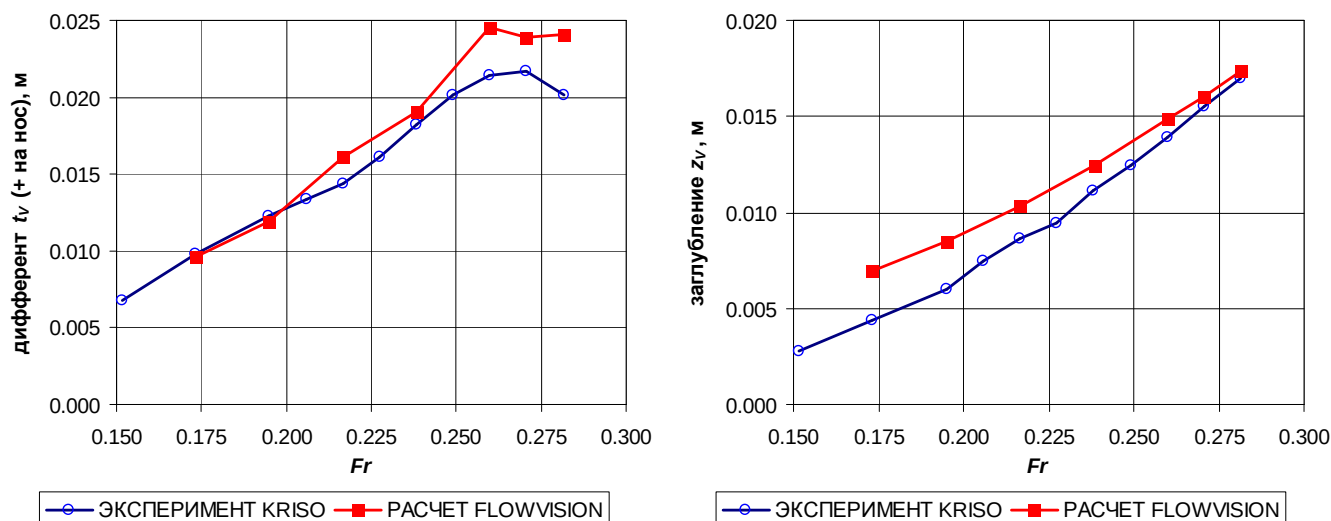


Рисунок 2.10 – Параметры свободной посадки KCS

Неопределенность экспериментальных данных по сопротивлению модели KCS согласно специальной оценке в [92] составляет $\pm 1\%$, точность модельного эксперимента в опытовых бассейнах обычно лежит в интервале $\pm 3\%$. Оценка неопределенности численного моделирования является достаточно сложной задачей и в настоящей работе не выполнялась. Судя по относительной

погрешности, уровень результатов выглядит по сравнению с экспериментом неплохо, особенно с учетом сложности объекта исследования.

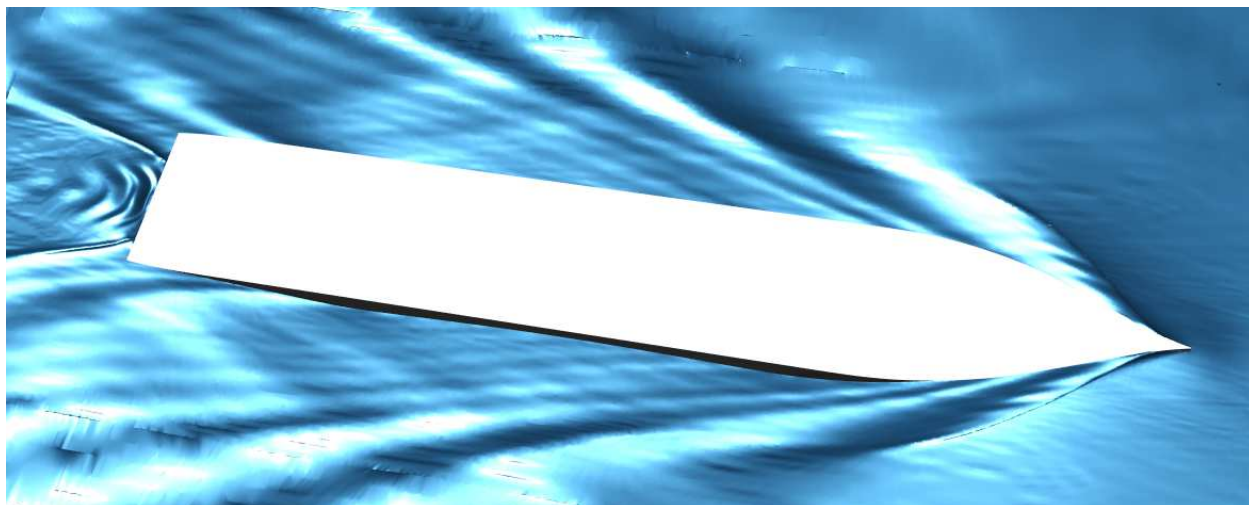


Рисунок 2.11 – Визуализация свободной поверхности при обтекании KCS,
 $Fr = 0.282$

Средняя относительная погрешность для модели со свободной посадкой составила +4.3%, однако больший вклад в нее внесли точки с низкими Fr , в которых коэффициенты остаточного сопротивления C_R по данным эксперимента мало отличаются от постоянного значения.

Участок кривой с постоянными C_R всегда требовал особых усилий в модельном эксперименте и достаточно плохо поддается численному моделированию. Объективная сложность модели KCS заключается в том, что этот участок доходит до необычно больших Fr , что, по-видимому, связано с близкой к оптимальной интерференцией элементов волновой системы.

Повышение точности расчетов обтекания KCS при низких Fr является одной из интересных задач для дальнейших исследований. Здесь же отметим, что для точек с $Fr > 0.26$, где зависимость C_R от Fr имеет обычный растущий характер, средняя погрешность составила лишь +1.4%.

Относительные погрешности расчетов в различных ПК по итогам семинара «Гетеборг-2010» и полученные в настоящей работе сопоставлены на рис. 2.12. Погрешности по данным семинара показаны для всех тестовых задач (из них более 60% по модели KCS) в зависимости от числа расчетных ячеек сетки и

способа моделирования турбулентности. Как видно из рисунка, полученные в ПК FLOWVISION погрешности находятся на уровне современных аналогов.

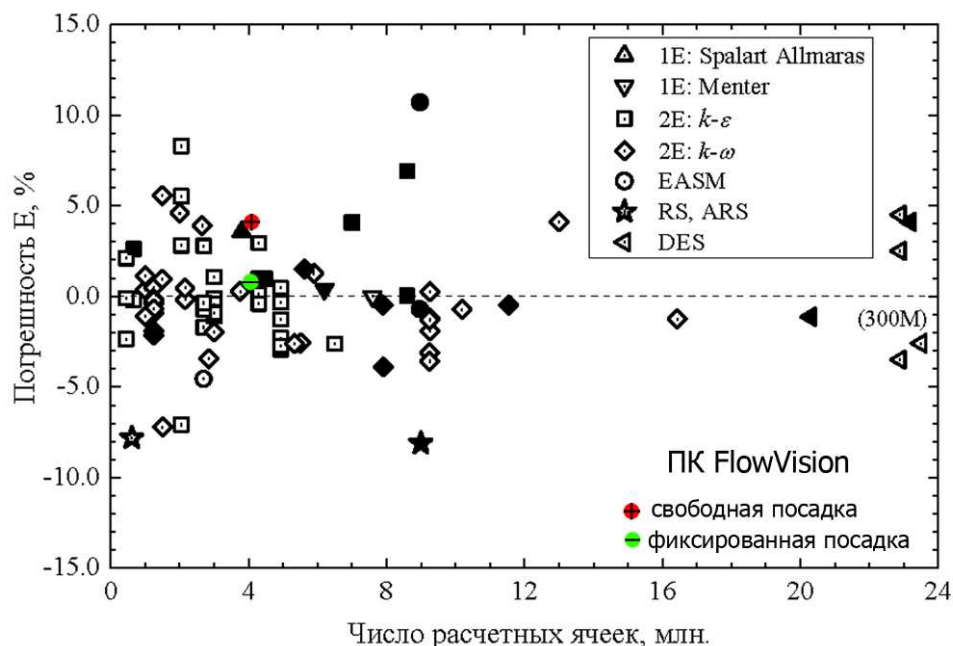


Рисунок 2.12 – Точность расчетов KCS на фоне данных семинара «Гётеборг-2010»

2.3.2. Результаты численного моделирования полного тихоходного ССП

Характерной особенностью ССП является необходимость учитывать при проектировании формы корпуса путевые ограничения, которые жестко определяют главные размерения. Так, габаритные размерения рассмотренного объекта соответствуют условиям эксплуатации через шлюзы Волго-Донского речного канала (ВДРК). Следствием ограничения главных размерений является принятие в проекте неоптимальных их соотношений и чрезвычайно высокого коэффициента общей полноты около 0.9. В последние годы большое количество судов с подобными обводами строится по отечественным проектам для работы на внутренних водных путях и в прибрежных морских районах.

Носовые обводы ССП таранно-конические, кормовая оконечность транцевая, с центральным обтекателем для установки одновального винторулевого комплекса. Основные элементы теоретического чертежа (главные размерения) в масштабах модели и натуре представлены в табл. 2.4. Теоретический чертеж представлен в Приложении В на рис. В.3 и рис. В.4.

Таблица 2.4 – Главные размерения ССП

Характеристики объекта	Натура	Модель (М1:18.7)
Длина по ватерлинии L_{WL} , м	137.8	7.3671
Ширина B , м	16.5	0.8824
Высота борта D , м	6.0	0.3209
Осадка d , м	4.6	0.2460
Водоизмещение объёмное ∇ , м ³	9325.8	1.4261
Площадь смоченной поверхности S , м ²	3271.6	9.3556
Коэффициент общей полноты C_B	0.892	
Относительная абсцисса ЦВ L_{CB} (%), в нос «+»	+1.23	

Буксировочные испытания модели ССП были выполнены в большом опытовом бассейне Крыловского государственного научного центра (КГНЦ) [24]. Модель судна была испытана с выступающими частями (канал носового подруливающего устройства, скуловые кили и трехперьевая система рулей Енкаля) – рис. 2.13. Численное моделирование выполнено в масштабе натуры, его результаты сопоставлены с данными пересчета результатов испытаний.

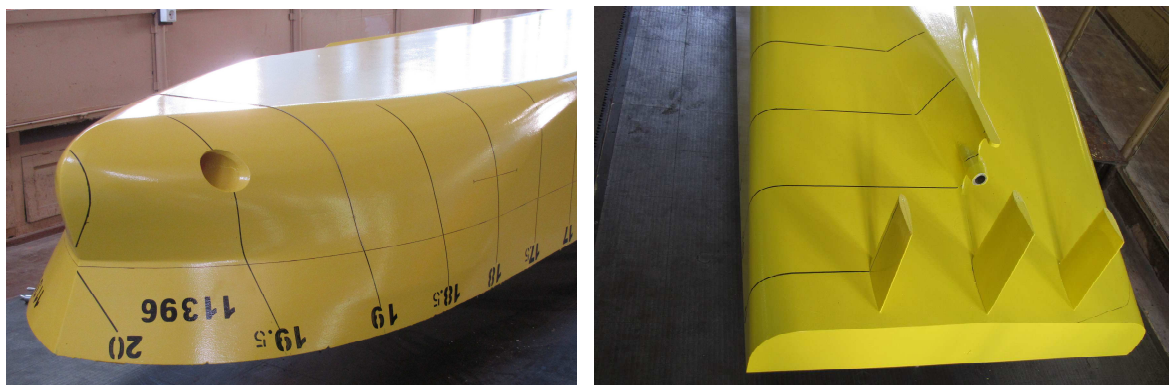


Рисунок 2.13 – Фотографии испытанной модели ССП

Источник: [24]

Численное моделирование со свободной поверхностью выполнено только для голого корпуса. Выступающие части были учтены с помощью расчетов с плоскостью симметрии на уровне ватерлинии (аналог испытания дублированной модели). Коэффициент выступающих частей затем учитывался в коэффициенте

остаточного сопротивления судна для сравнения с экспериментальными данными. Ввиду низких Fr учет свободной посадки не выполнялся.

Для выполнения расчетов были использованы вычислительные ресурсы Фонда суперкомпьютерного центра Кастилии и Леона (FCSCCL), предоставленные в ходе международного проекта The Uber-Cloud HPC Experiment [74].

Результаты сравнения данных по буксировочному сопротивлению представлены в табл. 2.5, а также в графической форме на рис. 2.14.

Таблица 2.5 – Сопротивление ССП

Число Фруда	Эксперимент КГНЦ		Расчет FLOWVISION		Расхождение в C_T , %
Fr	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	E
0.1399	0.8770	2.5530	0.9065	2.5825	+1.2%
0.1539	1.0620	2.7178	1.0845	2.7403	+0.8%
0.1609	1.1940	2.8405	1.1288	2.7752	-2.3%
0.1679	1.3750	3.0126	1.3750	3.0126	+0.0%
0.1749	1.5750	3.2042	1.5102	3.1394	-2.0%
0.1819	1.8540	3.4751	1.8883	3.5094	+1.0%
Средняя погрешность					-0.2%

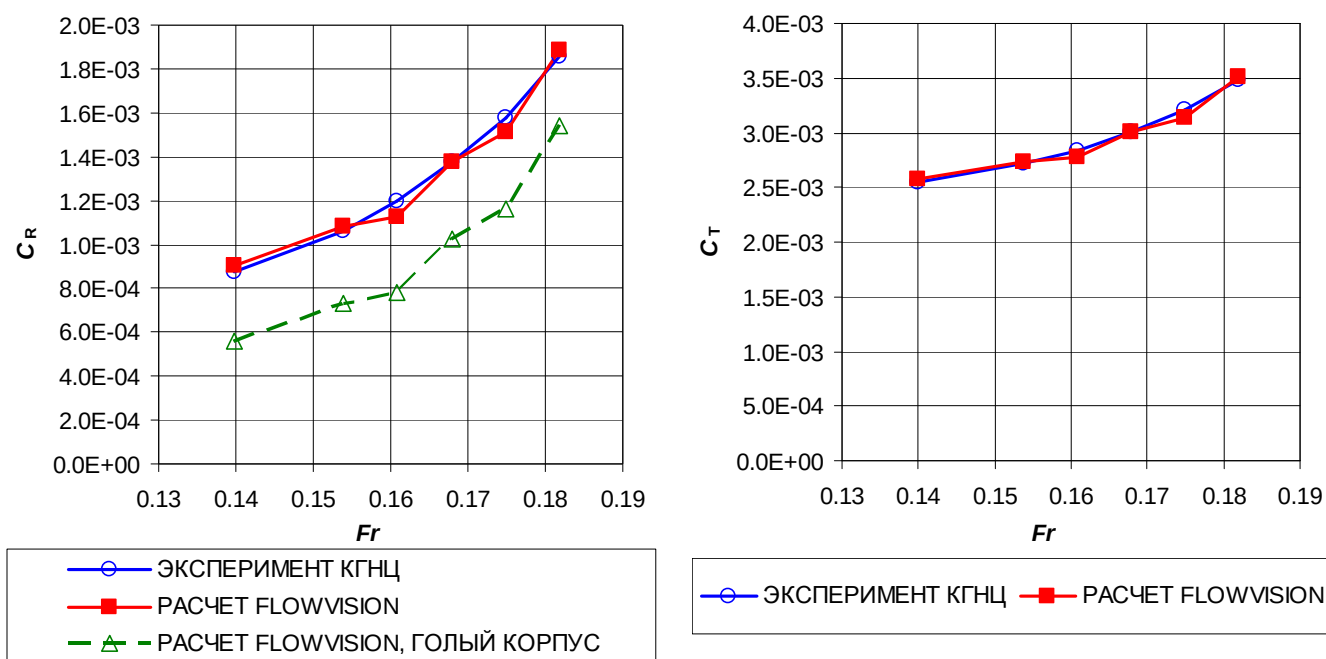


Рисунок 2.14 – Кривые коэффициентов сопротивления ССП

Сравнение показало высокую точность по буксировочному сопротивлению на всем рассмотренном диапазоне Fr , средняя относительная погрешность составила лишь -0.2%.

На рис. 2.15 представлены примеры визуализации обтекающего корпус потока, полученные в рамках численного исследования.

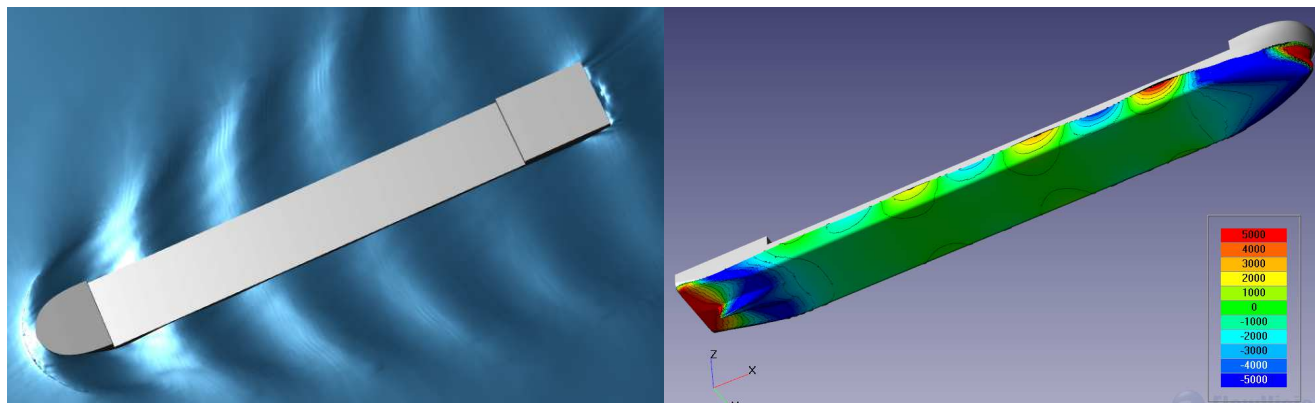


Рисунок 2.15 – Примеры визуализации обтекания корпуса ССП при $Fr = 0.18$: слева свободная поверхность, справа распределение давления (в Па)

2.4. Опыт проектирования обводов с использованием ВГД

В качестве отправных данных для обоснования методики численного моделирования обтекания корпуса судна использовались не только рассмотренные выше расчеты эталонных объектов, но и значительный объем данных по расчетам, выполненным для проектируемых и модернизируемых судов. Краткие сведения об объектах этих численных исследований представлены в табл. Г.1 Приложения Г.

Всего в табл. Г.1 приведены данные по 47 объектам различного типа, для 38 из которых при участии автора была спроектирована или модернизирована форма корпуса. К настоящему времени по 10 объектам имеются данные модельных испытаний, по 25 – приемно-сдаточных испытаний. Значительное число проектов, имеющее тенденцию к увеличению, выполнено без экспериментального исследования ходкости. Характеристики исследованных объектов охватывают достаточно широкий диапазон: $L = 18.5 \div 178.2 \text{ м}$, $L/B = 2.98 \div 8.87$,

$C_B = 0.45 \div 0.93$, $Fr = 0.11 \div 0.59$. Информация по некоторым проектам опубликована [2, 4, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 19, 20, 21, 22, 28, 55, 77].

Краткая информация о сравнении данных численных расчетов и модельных испытаний по объектам, за исключением рассмотренных выше эталонных судов, представлена в Приложении Д. Все численные исследования выполнены в натурном масштабе. Результаты сравнения в целом подтвердили вывод о том, что по уровню точности методы ВГД в настоящее время можно считать сопоставимыми с экспериментальными. Вместе с тем, встречаются и существенные расхождения. Анализ показал, что в большинстве случаев эти расхождения полностью или частично могут быть объяснены причинами, связанными с неполным соответствием исходных данных и процедур обработки результатов. Подобные обстоятельства нередко встречаются в практике проектных работ, и их приходится учитывать при выборе объектов для проведения научных исследований.

На основе данных, представленных в Приложении Д, можно также сделать вывод, что тихоходные ССП с высокой и даже предельной полнотой обводов, вопреки устоявшемуся мнению, являются достаточно удобными объектами как экспериментальных, так и численных исследований. Данные по судам этого типа не содержат серьезных несоответствий, например, связанных с проявлениями масштабных эффектов. По нашему мнению, это объясняется особенностями обводов кормовой части, при которых отсутствуют существенные отрывы ПС. В свою очередь, такая форма обводов, отличающая ССП от морских судов сопоставимой полноты, связана с соотношением B/d , определяемым для ССП путевыми ограничениями.

2.5. Выводы по разделу 2

Используемые методы ВГД обладают достаточным уровнем адекватности и точности для получения предусмотренных постановкой задачи качественных и количественных результатов. Этот уровень достигнут за счет выбора ПК, методики численного моделирования обтекания корпуса, разработанной на

основе значительного числа расчетов, подтвержденных экспериментами в опытовых бассейнах и гидрлотках, а также приемно-сдаточными испытаниями судов, и тестирования этой методики с помощью эталонных судов.

Полученные результаты по эталонным судам могут служить надежной базой в дальнейшем исследовании задачи.

Научную новизну результатов раздела можно охарактеризовать следующим образом. Усовершенствована методика численного моделирования процесса обтекания судовых корпусов путем включения в нее рекомендаций по назначению продольных размеров расчетной области для судна заданных главных размерений, а также по формированию областей концентрации ячеек прямоугольной расчетной сетки, разрешающей обтекающий судовой корпус поток. Усовершенствования методики, выполненные на основе систематизации параметров и результатов произведенного моделирования обтекания корпусов 47 судов различной формы и скоростных режимов движения, обеспечили выполнение расчетов буксировочного сопротивления эталонных судов с точностью, соответствующей уровню современных мировых стандартов в сравнении с надежными данными экспериментальных исследований.

Относительно других особенностей методики можно отметить следующее. Первенство в разработке методик численного моделирования принадлежит пользователям ПК, которые начали применяться раньше по времени. Как отмечено выше, такие ПК были разработаны в странах Западной Европы, США и Японии (см. Приложение А). Однако методики численных исследований настолько тесно связаны с особенностями реализации численных методов (прежде всего, с ПК), что каждая из них, включая представленную в настоящей работе, с целом может рассматриваться как независимый научный результат.

Основные научные результаты раздела опубликованы в [4, 15, 18]; труды апробационного характера [10, 52, 74, 77]; дополнительно отражают результаты раздела статьи [53, 55, 67, 99].

РАЗДЕЛ 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НОСОВОЙ ЧАСТИ

3.1. Модель систематических трансформаций корпуса

В теории корабля наиболее известны два способа систематических трансформаций поверхности корпуса: способ аффинных преобразований и способ сдвига.

Аффинное преобразование применяется, когда возникает необходимость изменить главные размерения, сохраняя коэффициенты полноты – рис. 3.1. Если главные размерения до и после изменений связаны соотношениями:

$$l = L_1/L; \quad b = B_1/B; \quad t = d_1/d, \quad (3.1)$$

то координаты любых точек на поверхности измененного корпуса могут быть найдены по координатам соответствующих точек исходного корпуса на основании простых формул:

$$x_1 = lx; \quad y_1 = by; \quad z_1 = tz. \quad (3.2)$$

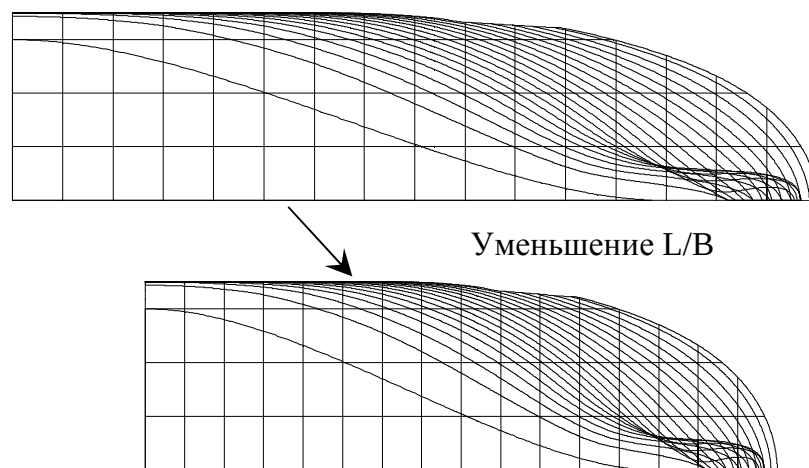


Рисунок 3.1 – Аффинное преобразование проекции «полуширота»

Способ сдвига, исследованный в работе Г. Лэкенби [91], сводится к перестановке шпангоутов исходного чертежа по длине судна без изменения их формы, что сопровождается изменением продольной полноты и строевой по шпангоутам – рис. 3.2, на котором обозначены: ω – безразмерная площадь

шпангоута в долях от площади миделя, $\Delta \nabla$ – изменение объемного водоизмещения, Δx – изменение абсциссы шпангоута.

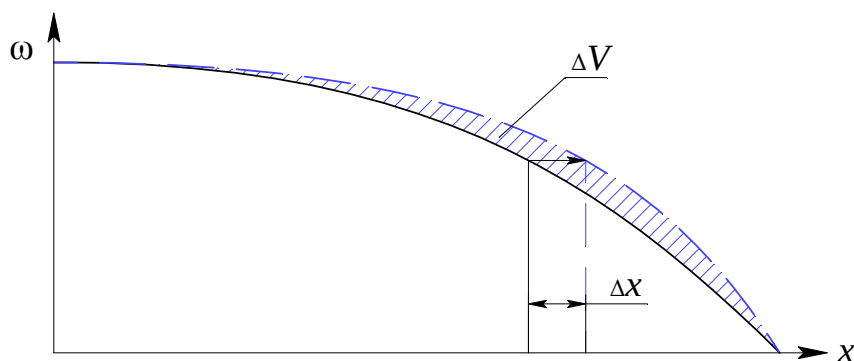


Рисунок 3.2 – Изменение строевой по шпангоутам способом сдвига

Оба способа отличаются сравнительной простотой графических приемов, что имело большое значение при выполнении этой работы вручную. Они нашли широкое практическое применение, в том числе при подготовке систематических модельных серий. Способ аффинных преобразований используется для вариации соотношений L/B и B/d при $C_B = \text{const}$. Способом сдвига варьируют характеристики продольного распределения водоизмещения.

Постановка задачи оптимальной трансформации носовой части предусматривает достаточно крупные локальные приращения водоизмещения. Пример задания изменений носовой ветви строевой полного судна показан на рис. 3.3. Очевидно, что способ аффинных преобразований всей судовой поверхности в данном случае неприменим.

Дальнейший перенос изменений со строевой на теоретический чертеж подразумевает наличие способа распределения площади шпангоутов по высоте. В качестве простого способа может рассматриваться описанный выше способ сдвига, согласно которому модифицируемый шпангоут заменяется на один из соседних, а также аффинное преобразование шпангоутов в районе изменений вдоль поперечной оси [40, с. 211].

При аффинном преобразовании шпангоутов их модификация осуществляется в соответствии с отношением площадей по исходной и

измененной строевым. По строевым устанавливают разность площадей для каждого шпангоута ΔA_{Fi} и вычисляют поправочные коэффициенты

$$k_i = \frac{A_{Fi} + \Delta A_{Fi}}{A_{Fi}}. \quad (3.3)$$

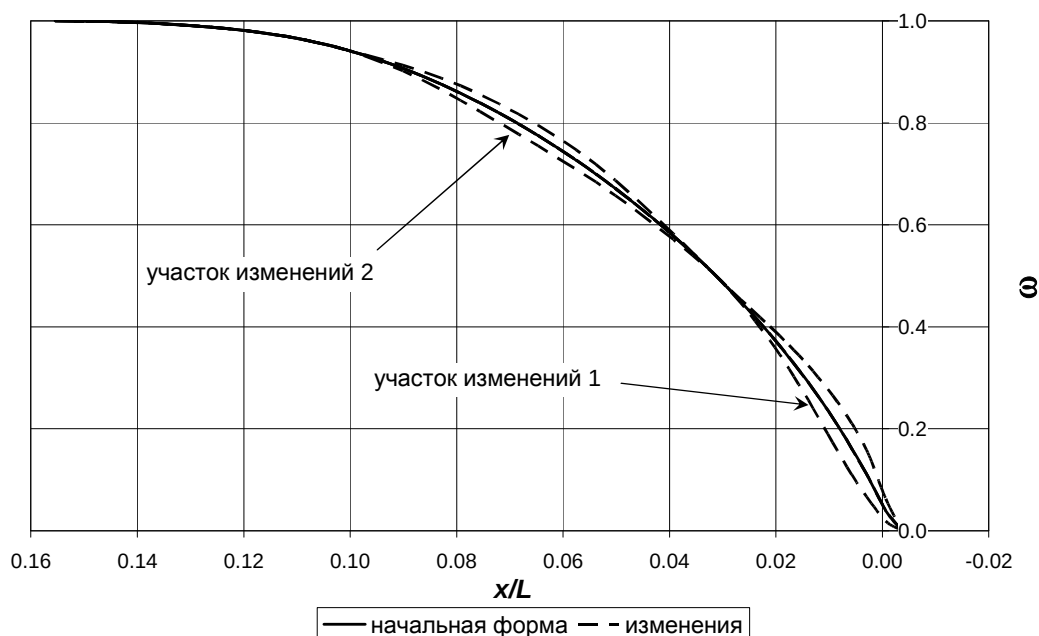


Рисунок 3.3 – Систематические локальные изменения строевой по шпангоутам

На поправочные коэффициенты (3.3) умножают ординаты ватерлиний на соответствующих шпангоутах, что дает новый теоретический чертеж.

Особенность аффинного преобразования заключается в сохранении относительной полноты кривой. В данном случае неизменным остается безразмерный закон распределения площади по высоте, который для каждого шпангоута может быть записан в виде зависимости коэффициента полноты площади шпангоута K_F от аппликаты z :

$$K_F = \frac{\int_0^z y(z) dz}{z \cdot y(z)}. \quad (3.4)$$

Так как сохраняется безразмерное распределение площади по высоте всех шпангоутов трансформируемого участка, вертикальное распределение полноты корпуса остается практически неизменным.

При использовании способа сдвига вертикальное распределение водоизмещения, напротив, активно изменяется. Для шпангоутов трансформируемого участка можно рассчитать поправочные коэффициенты, аналогичные (3.3), сопоставляя ординаты старого и нового шпангоута. Однако, в общем случае эти коэффициенты будут представлять собой некие зависимости от аппликаты z , поскольку новый и старый шпангоуты не связаны между собой. Можно сказать, что в результате использования способа сдвига часть исходной судовой поверхности, из которой перемещаются шпангоуты, распространяет характерное для нее вертикальное распределение полноты на изменяемый участок.

В целом, каждый способ распределения площади шпангоутов по высоте имеет свои преимущества и недостатки.

Преимуществом способа аффинного преобразования шпангоутов можно считать отсутствие влияния трансформаций на вертикальное распределение водоизмещения. Так как вертикальное распределение не имеет оптимума по волновому сопротивлению, в задаче совершенствования обводов его важно отслеживать. Способ сдвига не имеет этого преимущества.

Недостатком способа аффинного преобразования шпангоутов является отсутствие ограничений на ординаты шпангоутов, из-за чего они могут превышать полуширину судна. По этой причине способ удобен в основном для задания относительно небольших трансформаций в оконечностях. Способ сдвига же не обладает этим недостатком, он позволяет корректно перестраивать теоретический чертеж на участках, примыкающих к цилиндрической вставке.

Таким образом, способы дополняют друг друга, и в общем случае для МСТ полезно предусмотреть механизм распределения площади шпангоутов по высоте, использующий их комбинацию. В качестве базового предлагается использовать способ аффинного преобразования шпангоутов, поскольку сохранение неизменным распределения водоизмещения по высоте является весьма важным свойством в принятой постановке задачи совершенствования обводов. На трансформируемых участках, где способ аффинного преобразования шпангоутов

работает некорректно, применяются решения, соответствующие способу сдвига. В некоторых случаях вводятся и более сложные решения, например, для возможности фиксации формы палубы. Применяя разные решения на разных участках судовой поверхности по длине, необходимо предусмотреть и плавность переходов между ними.

3.1.1. Базовая модель систематических трансформаций

В настоящем пункте и далее геометрия судового корпуса рассмотрена в прямоугольной декартовой системе координат, начало которой расположено на пересечении ОП, ДП и НП. Ось x направлена в корму, ось y – на левый борт, ось z – вертикально вверх.

Как известно, строевая по шпангоутам – зависимость площади шпангоутов от продольной координаты, $A_F(x)$. Если судовая поверхность представлена функцией $y(x, z)$, то строевая по шпангоутам может быть записана в виде:

$$A_F(x) = \int_0^d y(x, z) dz. \quad (3.5)$$

Величина площади под кривой (3.5) равна водоизмещению части корпуса, заключенной между началом координат и шпангоутом с текущей абсциссой x :

$$V(x) = \int_0^x \int_0^d y(x, z) dz dx. \quad (3.6)$$

Выражения (3.5) и (3.6) описывают распределение водоизмещения в размерной форме, поэтому изменить общую полноту (величину водоизмещения) независимо от закона ее распределения с их помощью нельзя. Распределение полноты, не зависящее от величины водоизмещения, можно описать с помощью безразмерной зависимости коэффициента K_{PE} от абсциссы x :

$$K_{PE}(x) = \frac{\int_0^x A_F(x) dx}{xA_F(x)}. \quad (3.7)$$

Коэффициент K_{PE} представляет собой отношение водоизмещения части корпуса, заключенной между началом координат и шпангоутом с текущей

абсциссой x , к объему цилиндра, высота которого равна длине рассматриваемой части корпуса, а площадь основания равна площади шпангоута с текущей абсциссой x .

При расчете значений $K_{PE}(x)$ используется площадь текущего шпангоута, который, как правило, является наиболее полным, пока абсцисса x изменяется от начала координат в окрестности корпуса до границы цилиндрической вставки в пределах носовой части. Примем коэффициент K_{PE} , определяемый в указанных условиях, в качестве безразмерной характеристики продольного распределения полноты и будем в дальнейшем называть **локальным коэффициентом продольной полноты**.

При модификациях строевой по шпангоутам на локальных участках, подобных показанным на рис. 3.3, каждое изменение имеет вид новой части строевой, плавно состыкованной с ее существующей линией вне трансформируемого участка. Такое задание изменений необходимо для обеспечения общей плавности обводов. Поэтому, с учетом выражения (3.3), каждое изменение характеризуется непрерывной функцией для поправочных коэффициентов $k(x)$, причем уравнение измененной судовой поверхности приобретает вид $k(x) \cdot y(x, z)$.

Функция $k(x)$ на неизменных участках имеет постоянное значение 1, а на всем трансформируемом участке имеет либо значения больше 1 (увеличение полноты), либо меньше 1 (уменьшение полноты). Примерный график функции $k(x)$ для случая увеличения объема показан на рис. 3.4.

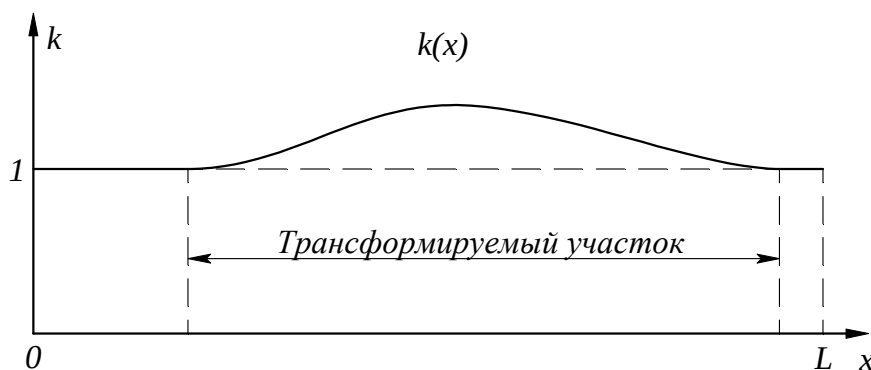


Рисунок 3.4 – Функция поправочных коэффициентов $k(x)$

С учетом функции $k(x)$ выражение для $K_{PE}(x)$ измененного корпуса, аналогичное (3.7), записывается в виде:

$$K_{PE}(x) = \frac{\int_0^x k(x) \cdot A_F(x) dx}{x \cdot k(x) \cdot A_F(x)}. \quad (3.8)$$

Согласно (3.8), введение $k(x)$ приводит к индивидуальной форме кривой $K_{PE}(x)$ для всей носовой части, что соответствует варьированию в ней продольного распределения водоизмещения.

Что касается влияния $k(x)$ в уравнении судовой поверхности на вертикальное распределение водоизмещения, то несложно показать, что безразмерное распределение остается постоянным в той части корпуса, где изменяемые шпангоуты непрерывны по высоте. В случае же модификации шпангоутов, площадь которых распределена не на всю осадку (носовой бульб, кормовой свес), безразмерное распределение водоизмещения по высоте изменяется. Однако интенсивность таких изменений для корпуса в целом мала. Для описания безразмерного вертикального распределения полноты используется коэффициент вертикальной полноты C_V , вычисляемый по ватерлинию на текущей аппликате z .

Рассмотрим пример использования предложенных характеристик. На рис. 3.5 показаны трансформированные шпангоуты в носовой части полного тихоходного ССП. Исходная форма носовой части и ее трансформации соответствуют изменениям строевой по шпангоутам на рис. 3.3. Теоретический чертеж исходного объекта представлен в Приложении В на рис. В.3 и рис. В.4.

На рис. 3.6 показаны графики $K_{PE}(x)$, соответствующие изменениям строевой и теоретического чертежа. Как видно из рисунка, все кривые имеют свой индивидуальный характер. При этом каждая пара кривых для изменений полноты одного знака приходит в левой части к одинаковым значениям K_{PE} для носовой части в целом, так как изменения по величине водоизмещения одинаковы.

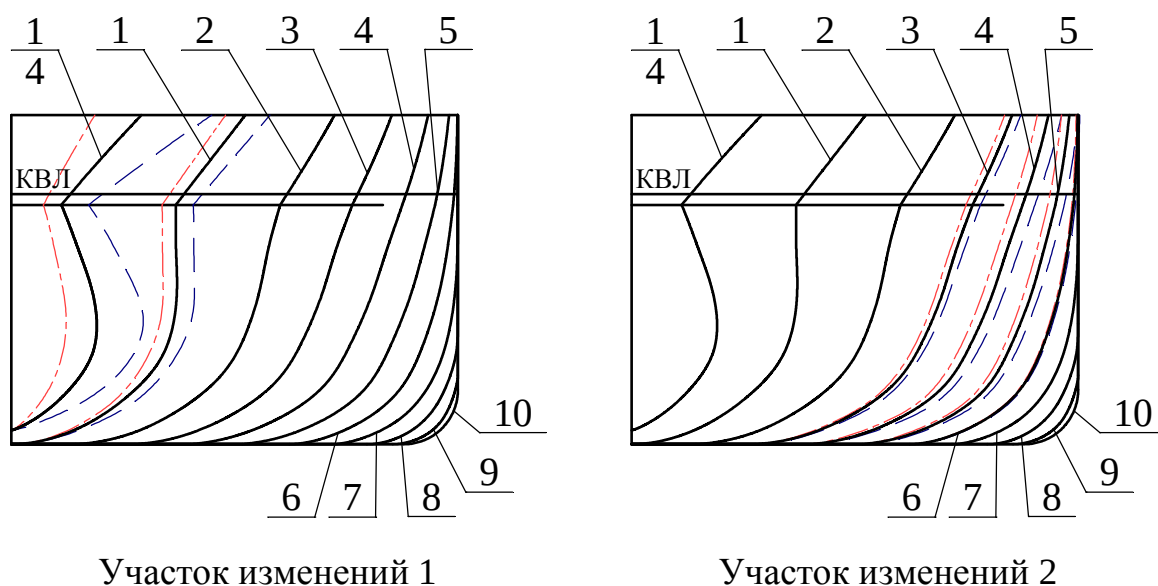


Рисунок 3.5 – Трансформация шпангоутов полного тихоходного ССП

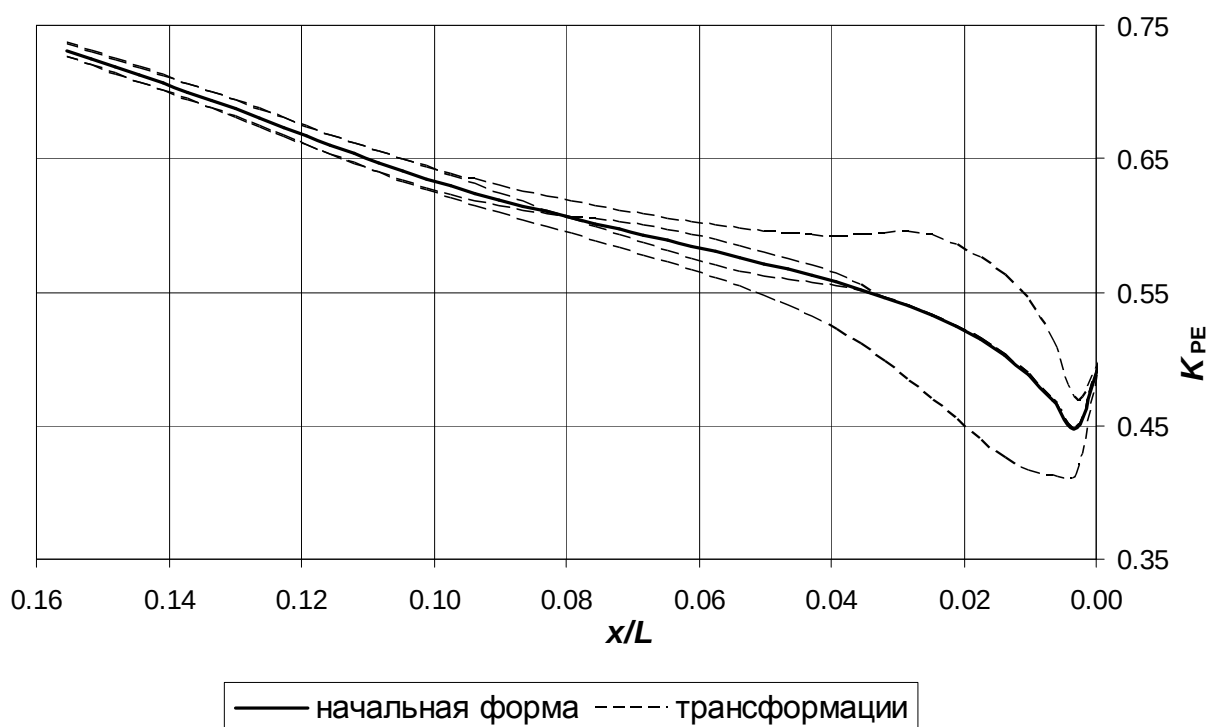


Рисунок 3.6 – Влияние модификаций обводов на кривые $K_{PE}(x)$

На рис. 3.7 представлен график зависимости коэффициента вертикальной полноты от осадки, вычисленного с учетом площади текущей ватерлинии, который одинаков для всех вариантов обводов, а также строевые по ватерлиниям $A_w(z)$ в нормированном виде $A_{wi}/A_{квл}$. Как видно из рисунка, строевые трансформированных носовых частей представляют собой аффинно преобразованную строевую исходной судовой поверхности.

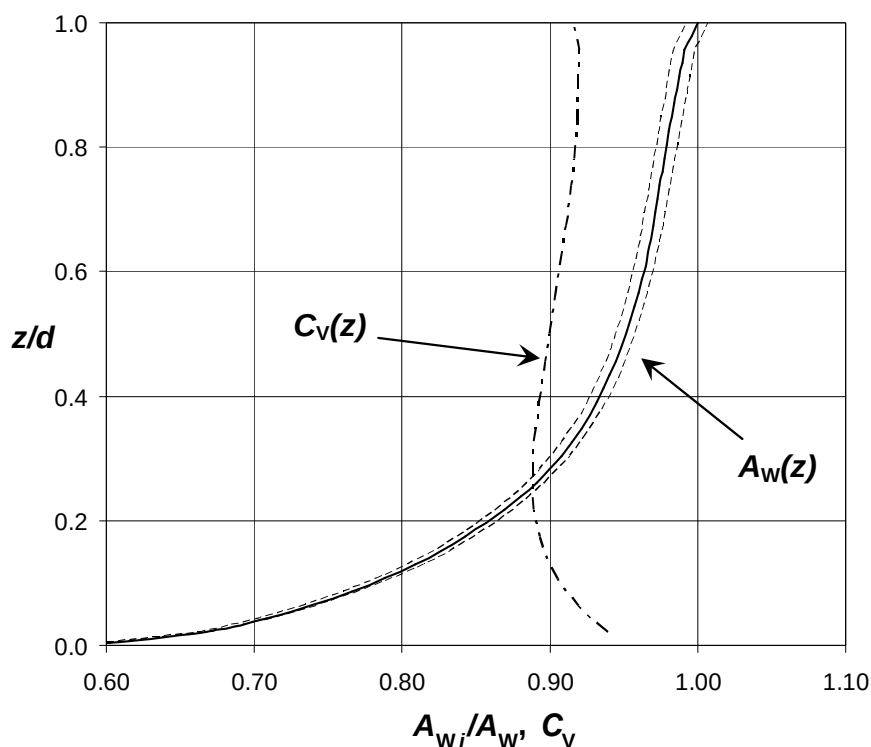


Рисунок 3.7 – Влияние модификаций обводов на кривые $C_V(z)$ и $A_{Wi}/A_{КВЛ}$

Трансформации корпуса ССП, соответствующие рис. 3.5, были реализованы автором с помощью средств графической САПР T-FLEX [58] в виде 3D моделей корпусов. Измерения 3D моделей, показали, что изменения коэффициента продольной полноты C_P прямо пропорциональны изменениям коэффициента общей полноты C_B – рис. 3.8. Это отвечает основной функции МСТ – перераспределению продольной полноты путем задания приращений водоизмещения на локальных участках.

На рис. 3.8 также показаны измеренные значения коэффициента вертикальной полноты C_V , которые имеют некоторый разброс случайного характера, но группируются около постоянного значения, близкого к исходному. Заметный разброс величин C_V объясняется тем, что оба исходных параметра для их расчета (водоизмещение и площадь ватерлинии) затронуты выполненными модификациями, которые реализуются в 3D моделях с некоторыми неточностями. При расчете же величин C_P из двух исходных параметров, которыми являются водоизмещение и площадь миделевого сечения, последний не входит в район изменений, ограниченный носовой частью, поэтому для всех вариантов обводов строго одинаков.

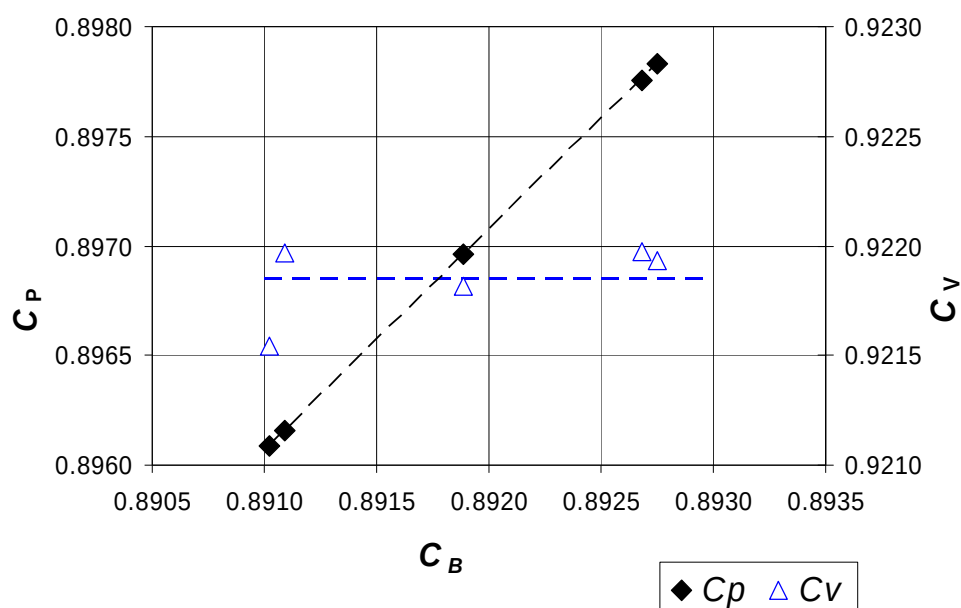


Рисунок 3.8 – Характер влияния изменений C_B на C_P и C_V

3.1.2. Расширенная модель систематических трансформаций

Базовая МСТ не во всех случаях удобна для модификации судовых форм. Ее недостатки проявляются в основном в двух случаях (рис. 3.9): 1) при увеличении площади шпангоута с развалом борта, ординаты которого в верхней части близки к полуширине судна, – происходит превышение полуширины; 2) при уменьшении площади шпангоута, близкого по форме к мидель-шпангоуту, – происходит его сужение вместе с вертикальным участком.

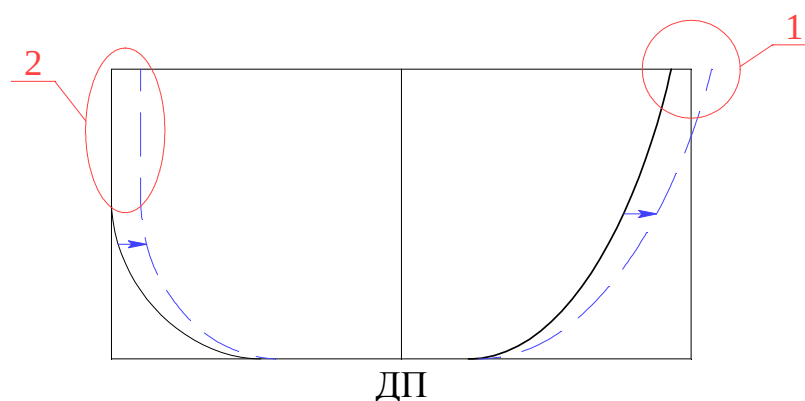


Рисунок 3.9 – Недостатки базовой МСТ

Базовая МСТ полностью корректна только для цилиндрических обводов. С ее помощью удобно модифицировать корпуса с резкими заострениями оконечностей (например, ССП) в районах, которые не граничат с цилиндрической

вставкой. Для обводов же умеренной и малой полноты характерны протяженные заострения оконечностей, поэтому применение к ним базовой МСТ затруднено.

Аффинное преобразование может применяться, когда верхние концы шпангоутов не приближаются к полуширине – вдали от цилиндрической вставки, при отсутствии дополнительных ограничений на изменение формы палубы.

Для участков, непосредственно примыкающих к цилиндрической вставке, корректным является способ сдвига. Очевидно, что любое корректное увеличение площади строевой ограничено величиной площади мидель-шпангоута. При достижении этой величины текущий шпангоут заменяется мидель-шпангоутом, который, таким образом, сдвигается из цилиндрической вставки в оконечность.

Вообще говоря, в отсутствии ограничений на изменение линии палубы, способ сдвига можно применять на любых участках поверхности, это не приводит к проблемам, показанным на рис. 3.9. Однако происходит весьма интенсивное перераспределение вертикальной полноты. Поэтому предлагается ограничить использование способа сдвига только районом у цилиндрической вставки.

Способ сдвига можно описать в алгебраической форме, сопоставив соответствующие одинаковым аппликатам z ординаты y двух шпангоутов – исходного и того, на который он заменяется. Полученные коэффициенты соотношений образуют зависимость от вертикальной оси $k(z)$, частным случаем которой является $k = \text{const}$, то есть аффинное преобразование. Удобнее использовать функцию вида $k_{\Delta}(z) = k(z) - 1$.

Между участками с аффинным преобразованием и способом сдвига вводится переходной участок, на котором шпангоуты модифицируются с помощью промежуточных зависимостей $k_{\Delta}(z)$, проведенных между линией $k_{\Delta} = \text{const}$ и $k_{\Delta F}(z)$, соответствующей преобразованию способом сдвига текущего шпангоута к соседнему. В качестве соседнего используется ближайший более полный шпангоут при увеличении площади и более острый при уменьшении. На рис. 3.10 показан примерный вид подобных построений (увеличение площади).

Преобразование кривых $k_{\Delta}(z)$ выполняется пропорционально длине переходного участка, на одном конце которого $k_{\Delta}(z)$ совпадает с $k_{\Delta F}(z)$ – способ

сдвига, а на другом с $k_{\Delta} = \text{const}$ – аффинное преобразование. Длина переходного участка выступает параметром, зависящим от особенностей исходных обводов.

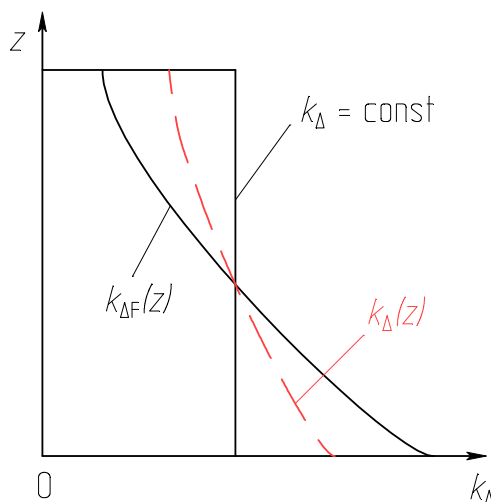


Рисунок 3.10 – Построение $k_{\Delta}(z)$ на переходном участке, палуба изменяется

Ниже представлен пример модификации носовой оконечности судна умеренной полноты KCS (см. пункт 2.3.1) по описанной выше модели. На рис. 3.11 показаны модификации носовой ветви строевой, на рис. 3.12 – соответствующие перестроения шпангоутов.

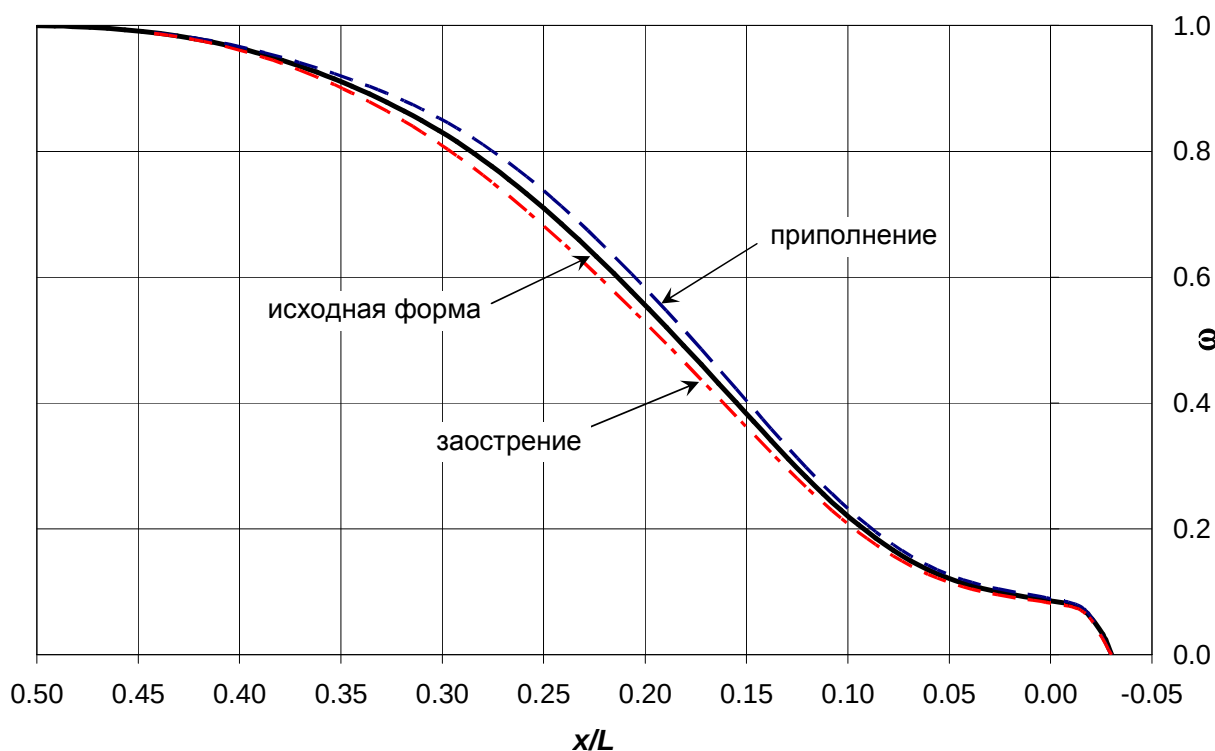


Рисунок 3.11 – Пример изменения носовой ветви строевой по шпангоутам KCS

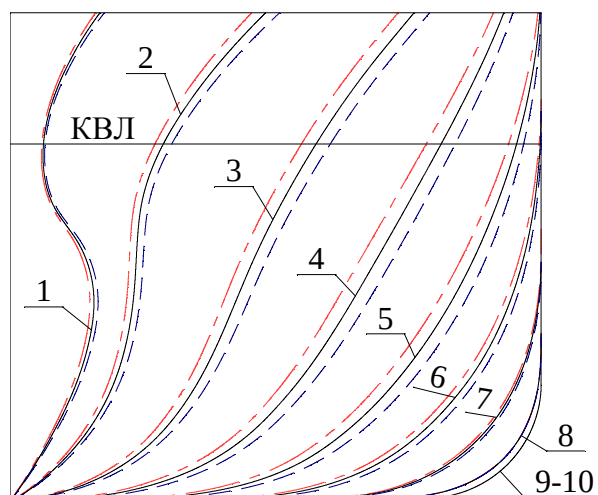


Рисунок 3.12 – Трансформация шпангоутов судна KCS, палуба изменяется

При необходимости сохранять форму палубы неизменной аффинное преобразование применять уже нельзя, а способ сдвига можно применять только к участку с плоским бортом так, чтобы его граница не смещалась по длине.

Вместо аффинного преобразования может быть использован любой другой закон распределения площади шпангоута по высоте $k_{\Delta}(z)$, отвечающий на уровне палубы условию $k_{\Delta} = 0$. При этом сохранить вертикальное распределение полноты неизменным для отдельных шпангоутов становится практически невозможно, и контроль за этой характеристикой сводится к отслеживанию влияния изменений на $\overline{KB}$.

В качестве наиболее простого закона $k_{\Delta}(z)$ предлагается наклонная линия, проходящая на уровне палубы через точку $k_{\Delta} = 0$. Наклон такой линии определяется из условия обеспечения заданной площади шпангоута после модификации, а уравнение в отрезках для осей (k_{Δ}, z) можно записать в виде:

$$\frac{k_{\Delta}}{2k_{\Delta A}} + \frac{z}{D} = 1, \quad (3.9)$$

где $k_{\Delta A}$ – соотношение площадей шпангоутов, которое используется при аффинном преобразовании ($k_{\Delta} = \text{const} = k_{\Delta A}$).

Для обеспечения плавности перехода между участком с линейным законом распределения площади (3.9) и участком, где используется способ сдвига,

аналогично случаю с изменяемой палубой вводится переходной участок – рис. 3.13.

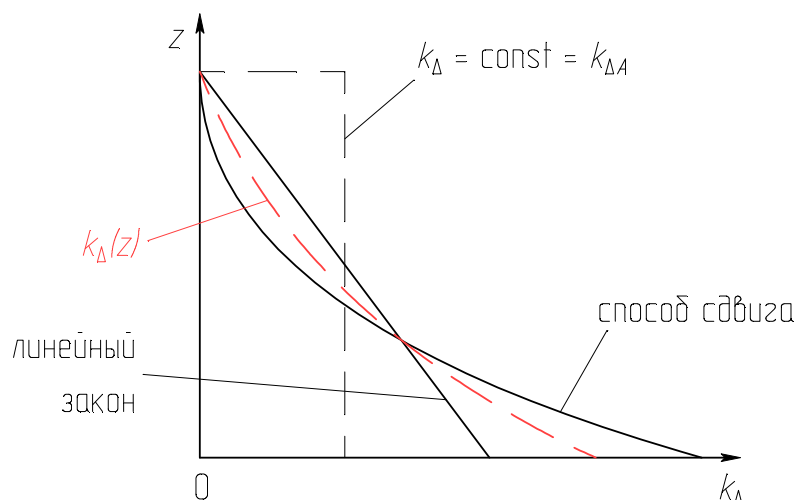


Рисунок 3.13 – Построение $k_{\Delta}(z)$ на переходном участке, палуба неизменна

Пример модификации носовой оконечности судна умеренной полноты KCS для случая неизменной палубы представлен на рис. 3.14 (модификации строевой соответствуют рис. 3.11).

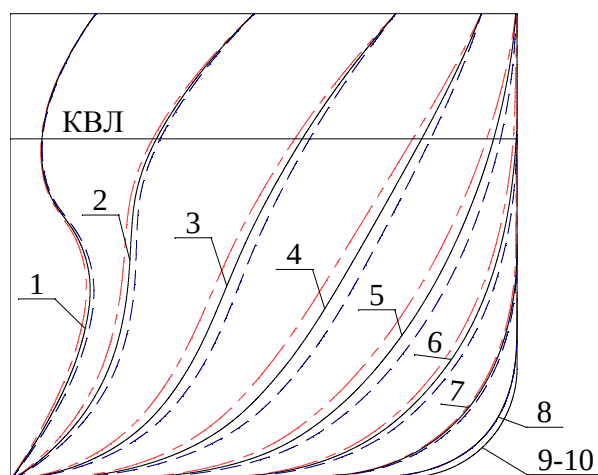


Рисунок 3.14 – Трансформация шпангоутов судна KCS, палуба неизменна

Расширенная МСТ в рамках работы подразумевает трансформацию судового корпуса одним из приведенных в настоящем пункте способов. При необходимости ее можно легко дополнять введением новых зависимостей $k_{\Delta}(z)$. Практическая реализация трансформаций предусмотрена средствами графической САПР T-FLEX в виде 3D моделей судовых корпусов.

3.2. Метод снижения сопротивления

3.2.1. Теоретический подход

Как отмечено при постановке задачи (подраздел 1.3), в формировании сопротивления судового корпуса важную роль играют процессы, связанные с системой корабельных волн на свободной поверхности.

Т. Хавелок в 1934 году показал [83], что величина волнового сопротивления на глубокой воде связана с параметрами волновой системы на большом удалении за телом выражением (1.2), причем эффективный путь снижения волнового сопротивления состоит в ослаблении поперечных волн.

Для непосредственного использования формулы Т. Хавелока в задаче совершенствования судовых обводов необходима теоретическая взаимосвязь между формой корпуса и параметрами волновой системы на большом удалении за судном. Как показано в подразделе 1.2, эта проблема до сих пор в общем виде не решена. Поэтому влияние формы корпуса на сопротивление приходится изучать с помощью численного или экспериментального моделирования. Тем не менее, общие сведения о волновой системе судна представляют в рамках задачи большую ценность.

Экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия носовой и кормовой волновых систем показали, что поперечные волны этих систем взаимодействуют, но результат их интерференции зависит только от Fr , то есть определяется только скоростью и длиной судна, а не формой обводов. Расходящиеся волны носовой и кормовой систем практически не взаимодействуют между собой. В то же время, существенную роль в формирование общей волновой системы вносят компоненты волн, которые образуются от районов корпуса между носом и кормой.

Эти особенности волновой системы судна позволяют выдвинуть *гипотезу* о независимости влияния разных участков корпуса по длине на волновое сопротивление. Гипотеза базируется на том, что при постоянном Fr трансформации судовой поверхности на отдельных участках по длине (в соответствии с МСТ) не могут существенно изменить конфигурацию волновой

системы. Их влияние приводит в основном к перераспределению энергии между поперечными и расходящимися волнами за счет накопления отдельных компонентов волн от разных участков. В соответствии с формулой Т. Хавелока, если перераспределение сопровождается ослаблением поперечных волн, волновое сопротивление судна снижается.

В условиях нерешенности теоретической проблемы сопротивления правдоподобность гипотезы на данном этапе нуждается в проверке с помощью численного или экспериментального моделирования. Очевидно, она принципиально не может претендовать на полную адекватность из-за нелинейных эффектов в волновой системе, а также влияния вязкости.

Основные отличия теоретического подхода, принятого в настоящей работе, от известных исследований состоят в следующем.

Как отмечено в подразделе 1.2, в своих работах Т. Инуи уже использовал формулу Т. Хавелока для поиска форм с минимальным волновым сопротивлением. В книге [94] Л. Ларсон и Х. Равен предложили методологию совершенствования обводов, в которой рекомендуют добиваться благоприятной интерференции волн в волновой системе, рассматривая отдельные волны от разных участков корпуса, и ориентируясь на формулу Т. Хавелока. Существуют и другие исследования с подобными подходами.

В этих работах исходным материалом для совершенствования обводов является волновая система. В подходе Т. Инуи предусмотрен специальный математический аппарат для перехода от благоприятной для сопротивления волновой системы к соответствующему распределению гидродинамических особенностей и замкнутым линиям тока, которые можно принять в качестве сечений корпуса. В методологии Л. Ларсона и Х. Равена на этапе постановки не делается различий между аналитическим, численным или экспериментальным подходами к моделированию волновой системы и определению сопротивления. Однако, в любом случае внесению изменений в форму корпуса предшествует анализ волнообразования на основе визуальной информации; изменение какого-

либо участка обосновывается требованиями к формируемому им компоненту волновой системы.

В методе, предлагаемом в настоящей работе, исходными являются изменения формы корпуса, влияние которых на сопротивление определяется численно, либо экспериментально. В этом отношении предлагаемый подход ближе к более ранним работам Э. Хогнера и, особенно, В.Г. Сизова, где исходными являлись точки судовой поверхности. По сравнению с ними в работе рассматриваются конечные изменения целых участков корпуса, заданных на строевой по шпангоутам. Кроме того, вместо аналитических методов расчета волнового сопротивления предусмотрено использование методов, позволяющих определять полное сопротивление корпуса с учетом вязкости.

Предлагаемый метод действует по принципу черного ящика, поскольку не требует дополнительной информации о том, что обуславливает изменение в сопротивлении: интерференция волн, изменение амплитуд волн или даже явления, связанные с вязкостью. Это позволяет включить в рассмотрение все многообразие явлений, сопровождающих обтекание судового корпуса. Допущение, согласно которому влияние на формирование волновой системы является основным следствием любых изменений в обтекании корпуса и соответствует принятой в методе снижения сопротивления гипотезе.

Гипотеза используется на этапе обработки результатов моделирования, в результате чего суммарный эффект трансформаций корпуса, оказываемый на полное сопротивление, прогнозируется как суперпозиция отдельных эффектов. Это соответствует принципу интерференции, которому в основном подчиняются изменения в волновой системе судна.

В методе не используются какие-либо аналитические выражения для расчета волнового сопротивления. Разработка метода, а также исследования с его помощью объектов в рамках работы в целом базируются на принципах, близких к экспериментальным.

С практической точки зрения использование гипотезы позволяет существенно ускорить решение задачи совершенствования обводов.

Если выделить по длине корпуса n участков и на каждом из них задать p изменений, то простой перебор требует исследования p^n вариантов. Если же использовать гипотезу о независимости влияния участков, то потребуется исследовать всего $(pn + 1)$ вариант, включая проверку усовершенствованных обводов.

Использование гипотезы придает методу специализированный характер, так как нацеливает его исключительно на волновую составляющую. В случае обтекания судна это оправданно тем, что если волновое сопротивление и составляет меньшую часть полного сопротивления, трансформации корпуса все же в основном отражаются на нем (волновое сопротивление – активное). В случае же вязкого обтекания без свободной поверхности гипотеза заведомо неверна, так как особенности формирования ПС обуславливают большое влияние участков, лежащих выше по потоку, на участки, лежащие ниже.

3.2.2. Описание алгоритма совершенствования формы

Разработка метода снижения сопротивления, заключительного элемента комплексного метода оптимальной трансформации, позволяет описать использование последнего в виде соответствующего алгоритма, называемого далее алгоритмом совершенствования формы (АСФ).

АСФ предусматривает выбор n участков по длине судна, на которых с помощью строевой по шпангоутам можно задать трансформации, подобные показанным на рис. 3.3. Выбор расположения и размеров участков выполняется по следующим принципам. Каждый из них должен обеспечивать задание приращения объемного водоизмещения δV в виде части строевой, плавно состыкованной с ее существующей линией вне участка. Желательно иметь возможность задавать приращения δV разного знака, но близкие по величине.

Выбор величин δV осуществляется в соответствии с особенностями начальной формы корпуса и различными ограничениями на ее изменения. У острых судов возможности по заданию изменений, как правило, более широкие, чем у полных. Проработки показали, что с учетом соблюдения разнообразных требований на ветви строевой острого судна целесообразно выделять до трех

трансформируемых участков, полного судна – как правило, два. При этом величины δV составляют 0.1% – 0.5% объемного водоизмещения.

После подготовки с помощью МСТ теоретических чертежей и 3D моделей корпусов с модификациями выполняется численное моделирование их обтекания. В результате для каждой модели имеется величина приращения буксировочного сопротивления δR (относительно начального корпуса).

Для повышения гибкости алгоритма результаты по каждому участку можно представить в виде непрерывной зависимости $\delta R = f(\delta V)$. Имея всего две величины δR (при $\pm \delta V$), реконструкцию зависимости можно выполнить по трем точкам (используя 0), например, с помощью функции вида $y = Ax^2 + Bx$.

Текущие значения δV в выражениях $\delta R = f(\delta V)$ для каждого участка становятся варьируемыми параметрами. Оптимальная комбинация параметров, соответствующая усовершенствованным обводам, отвечает целевой функции:

$$Z = \min \left(\sum_{i=1}^n \delta R_i(\delta V_i) \right). \quad (3.10)$$

Условие постоянства водоизмещения отвечает функции ограничения:

$$\sum_{i=1}^n \delta V_i = 0. \quad (3.11)$$

Поиск оптимальной комбинации параметров при $n = 2$ сводится к анализу функции одной переменной, к которой преобразуется $\sum \delta R_i(\delta V_i)$ в (3.10), так как условие (3.11) приводит к $\delta V_1 = -\delta V_2$. При числе участков $n > 2$ число переменных в функции возрастает, и для ее анализа могут потребоваться сложные методы. В том числе можно использовать алгоритмы оптимизации, подобные описанным в подразделе 1.3. Однако, при этом не будет необходимости в дополнительном численном моделировании.

Полученные значения δV_i используются для получения с помощью МСТ теоретического чертежа и 3D модели корпуса с усовершенствованными обводами. С помощью численного моделирования обтекания этого корпуса выполняется проверка и уточнение полученных результатов.

Корпус с усовершенствованными обводами затем принимается в качестве исходного на следующем шаге алгоритма, который можно выполнять до тех пор, пока будет существовать возможность снижения сопротивления, то есть при условии:

$$\sum_{i=1}^n \delta R_i(\delta V_i) < 0. \quad (3.12)$$

Принципиальная блок-схема АСФ представлена на рис. 3.15.

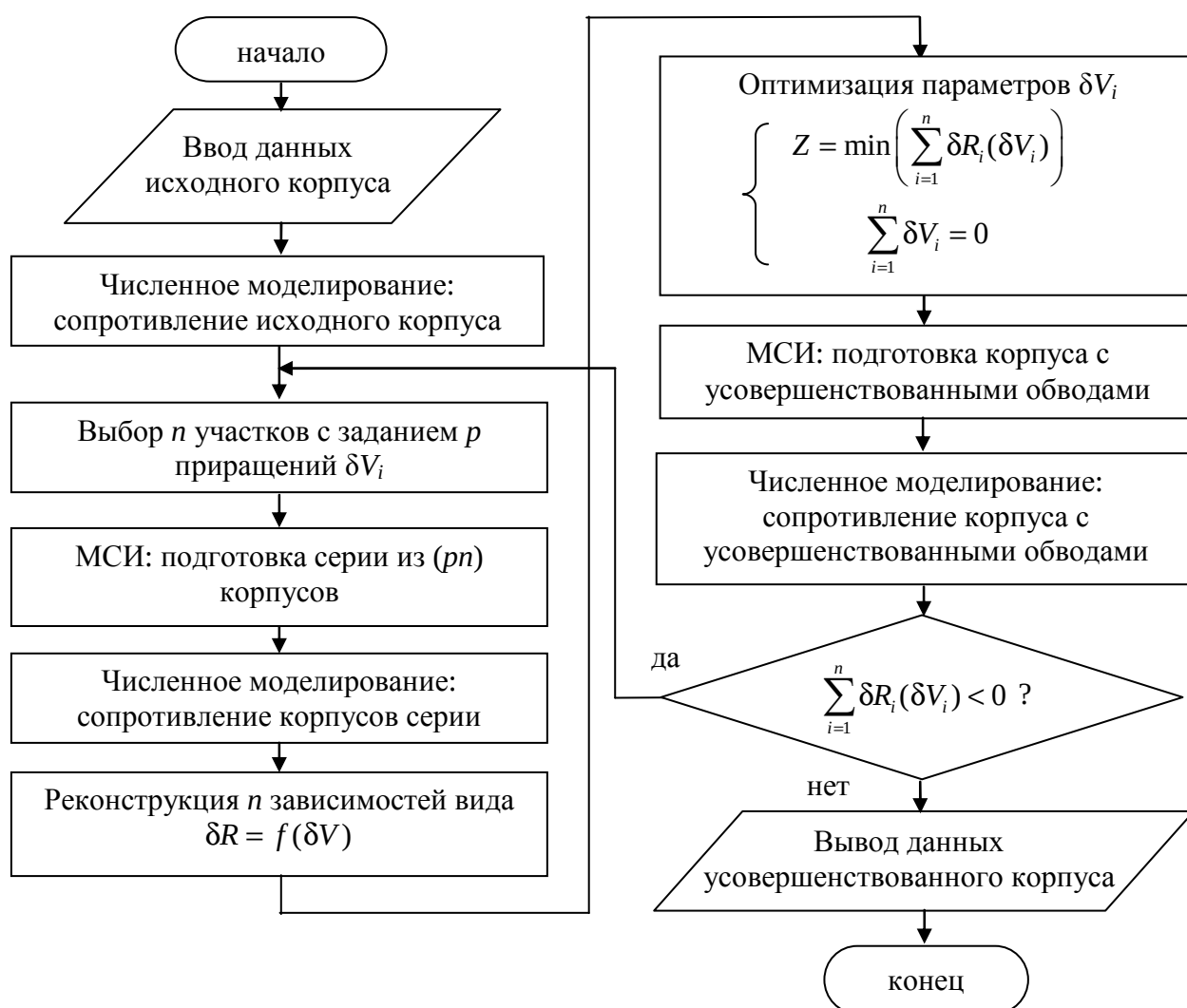


Рисунок 3.15 – Принципиальная блок-схема АСФ

3.3. Совершенствование обводов полного тихоходного ССП

3.3.1. Объект исследования

Объект исследования представлен выше в пункте 2.3.2, где изложены результаты численного моделирования его обтекания как эталонного судна в рамках тестирования предложенной методики. Основные элементы теоретического чертежа (главные размерения) в масштабах модели и натуре представлены в табл. 2.4. Теоретический чертеж представлен в Приложении В на рис. В.3 и рис. В.4. Все расчеты в рамках задачи совершенствования обводов выполнены в натурном масштабе.

3.3.2. Первый шаг алгоритма

На первом шаге алгоритма с помощью базовой МСТ (аффинное преобразование шпангоутов) в носовой оконечности на двух участках были заданы приращения объема величиной около 0.1% объемного водоизмещения разного знака, в результате чего получено четыре варианта обводов. Модификации безразмерной строевой по шпангоутам показаны на рис. 3.16, соответствующие трансформации проекции «корпус» показаны на рис. 3.17 (носовая оконечность по длине разбита на 10 условных шпаций). Основные геометрические характеристики начального и модифицированных вариантов корпуса представлены в табл. 3.1.

Для 3D модели исходной формы и четырех моделей с трансформациями (модели 0 – 4) было выполнено численное моделирование обтекания в натурном масштабе при скорости 13 узлов ($Fr = 0.182$). Полученные значения сопротивления моделей представлены в табл. 3.2 и на рис. 3.18.

Согласно результатам расчетов, вариации формы привели к колебаниям полного сопротивления корпуса на 1-2%. Колебания возникли почти исключительно в составляющей давления.

Влияние знака δV на сопротивление на двух участках носит противоположный характер. На первом участке (ближе к форштевню) увеличение

объема приводит к снижению сопротивления. На втором участке между водоизмещением и сопротивлением зависимость прямая.

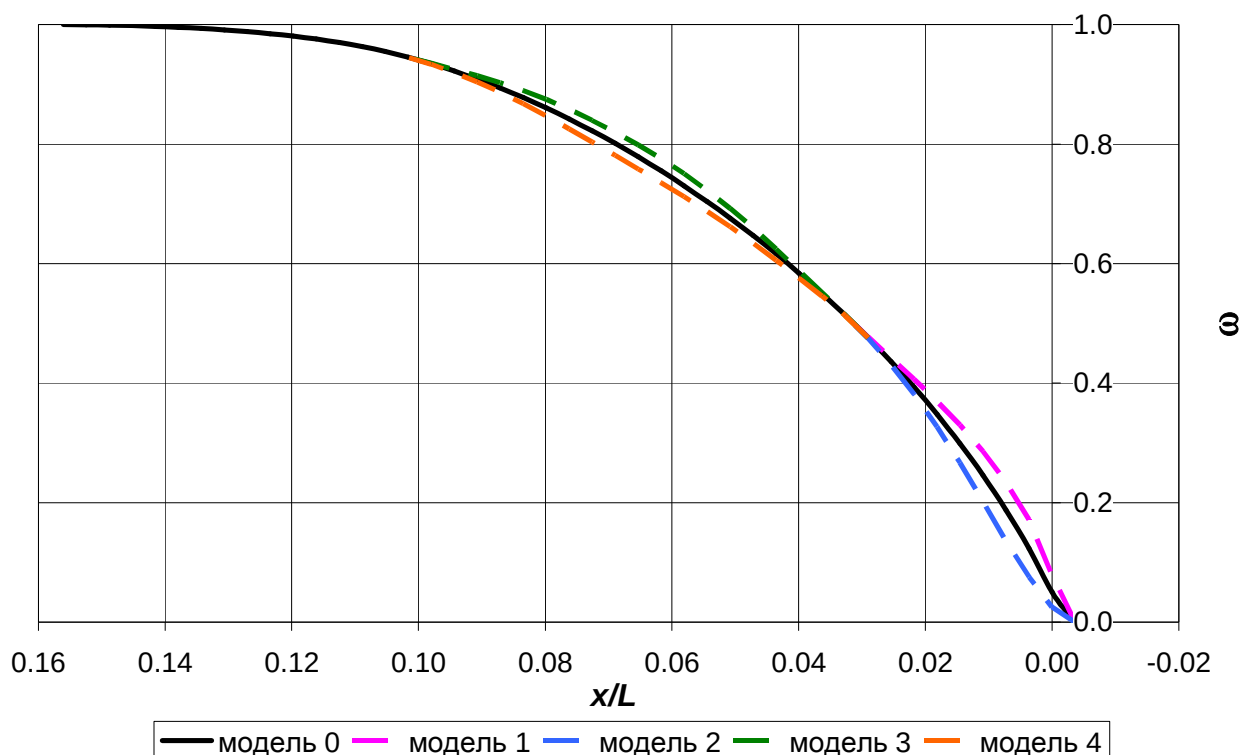


Рисунок 3.16 – Изменения строевой по шпангоутам (первый шаг)

Таблица 3.1 – Характеристики 3D моделей (первый шаг)

Характеристики объектов		Исходная форма	1-й участок		2-й участок	
3D модель №		0	1	2	3	4
Знак δV			+	-	+	-
Длина по КВЛ, L_{WL}	м	137.764				
Ширина, B	м	16.500				
Осадка по КВЛ, T	м	4.600				
Водоизмещение, ∇	м ³	9325.8	9334.9	9316.8	9334.1	9317.5
Смоченная поверхность, S	м ²	3271.6	3274.7	3269.4	3273.6	3269.6
Абсцисса ЦВ, X_{CB}	м	1.695	1.759	1.631	1.747	1.643
Апplikата ЦВ, $\overline{KB}$	м	2.373				
Коэф-т общей полноты, C_B	-	0.892	0.893	0.891	0.893	0.891
Коэф-т полноты миделя, C_M	-	0.994				
Коэф-т полноты КВЛ, C_W	-	0.965	0.968	0.967	0.968	0.967
Коэф-т продольной полноты, C_P	-	0.897	0.898	0.896	0.898	0.896
Коэф-т вертикальной полноты, C_V	-	0.921	0.923	0.921	0.923	0.921

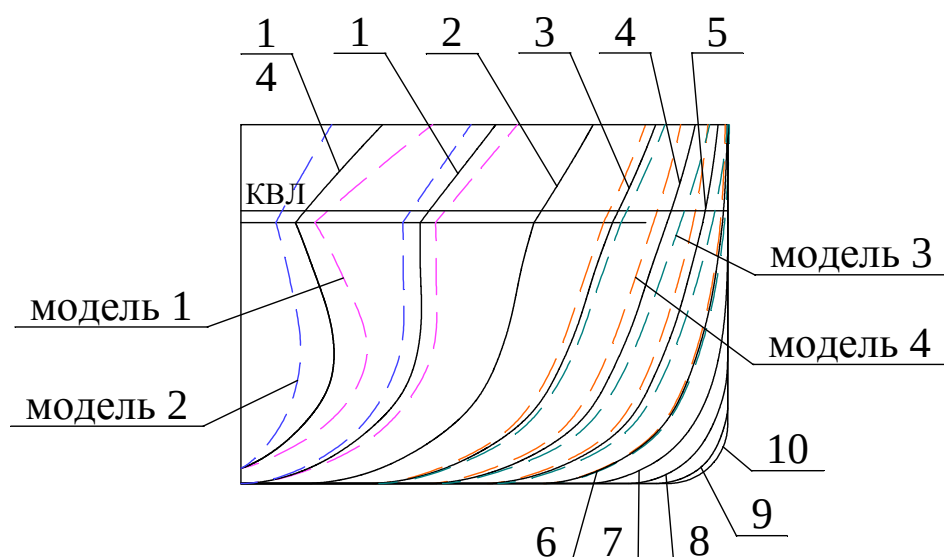


Рисунок 3.17 – Трансформации корпуса (первый шаг)

Таблица 3.2 – Сопротивление 3D моделей (первый шаг)

Характеристики объектов		Исходная форма	1-й участок		2-й участок	
3D модель №		0	1	2	3	4
Знак δV			+	-	+	-
Полное сопротивление корпуса, R_T	кН	236.9	231.0	239.4	241.7	234.0
Сопротивление давлению, R_p	кН	113.5	107.9	115.8	118.5	110.9
Сопротивление трения, R_F	кН	123.4	123.1	123.6	123.3	123.2

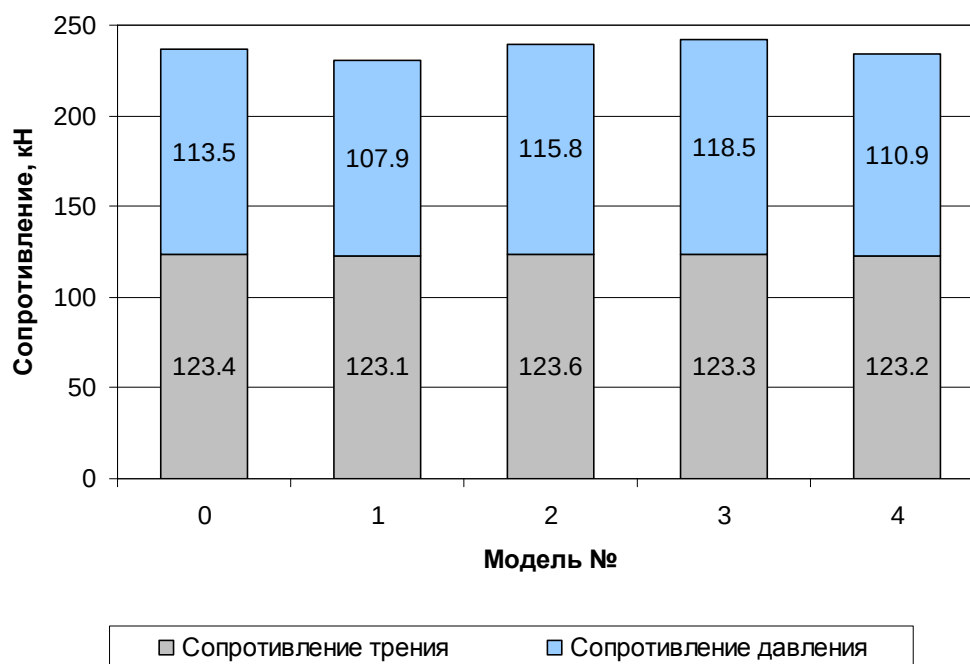


Рисунок 3.18 – Сопротивление 3D моделей (первый шаг)

Обработка результатов первого шага в виде зависимостей $\delta R(\delta V)$ и их производных $\lambda = dR / dV(\delta V)$ показана на рис. 3.19.

На рис. 3.19 результаты по отдельным моделям и реконструкции зависимостей показаны вдоль единой оси δV , положительные значения которой соответствуют увеличению объема на первом участке. Значения δV на втором участке отложены с обратным знаком. Такая система отсчета удобна для отображения суммарного изменения сопротивления $\sum \delta R(\delta V)$ (показано жирной черной линией) при условии постоянного водоизмещения. Как видно из рисунка, сопротивление возрастает относительно исходных обводов при заострении первого участка и снижается при его приполнении.

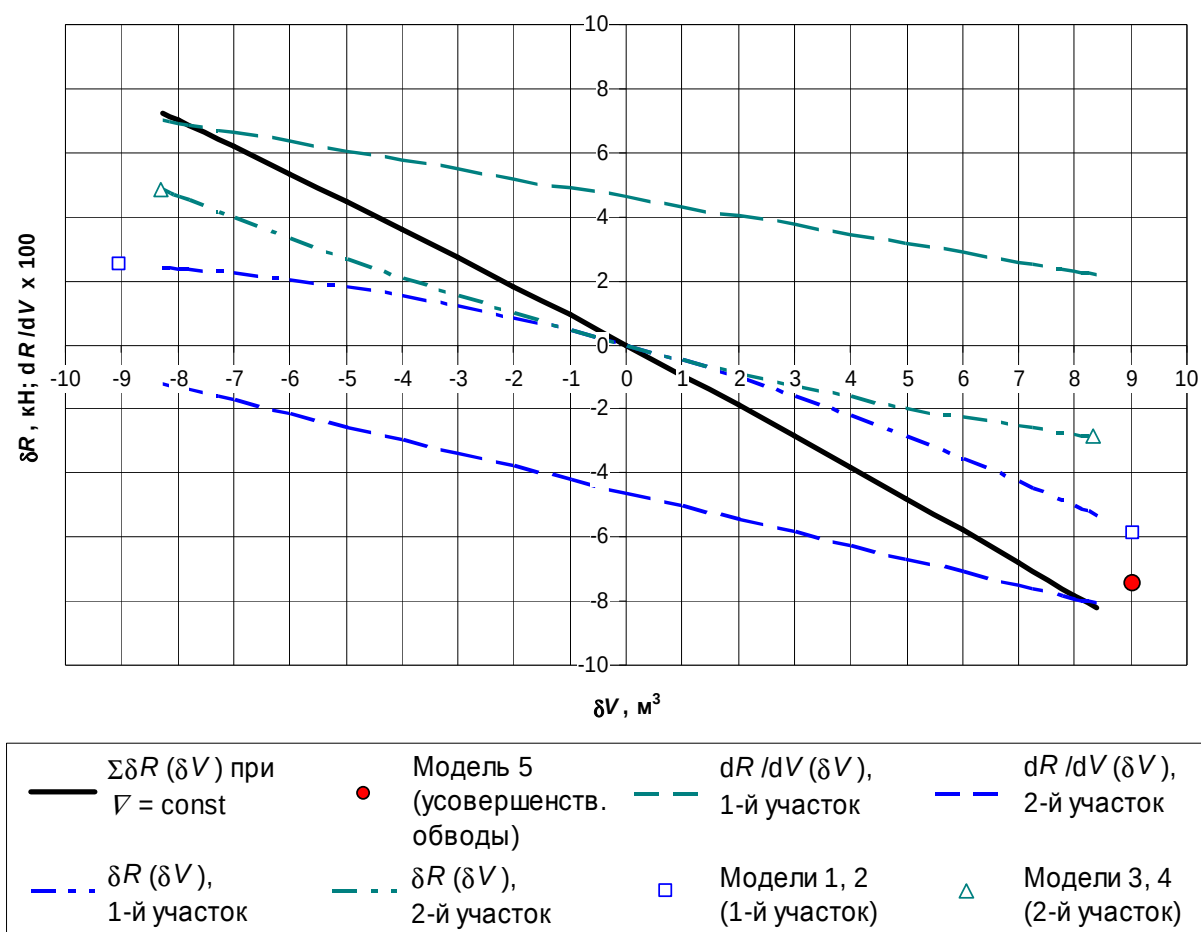


Рисунок 3.19 – Обработка результатов (первый шаг)

Максимальный выигрыш в полном сопротивлении корпуса получается при переносе всего заданного δV со второго участка на первый (правая граница

графика на рис. 3.19). Оценка выигрыша составила 8.22 кН или 3.5%. Численное моделирование по модели 5 с усовершенствованными обводами, подготовленной с помощью МСТ, показало снижение сопротивления на 7.45 кН или на 3.1%.

Обработка результатов первого шага указала на перспективность дальнейшего переноса водоизмещения со второго участка на первый. Для начальной формы (при $\delta V = 0$) производные $\lambda = dR / dV$ на двух участках имеют противоположные знаки. Из рис. 3.19 видно, что и на правой границе, где находится результат первого шага, сохраняется та же ситуация. Соответственно, кривая суммарного изменения сопротивления при постоянном водоизмещении $\sum \delta R(\delta V)$ продолжает в правой части достаточно резкое падение. Поэтому на втором шаге алгоритма в тех же районах достаточно задать всего два δV разного знака и с помощью двух дополнительных моделей проверить возможность развития этого направления.

3.3.3. Второй шаг алгоритма

На втором шаге в качестве исходной принята модель 5. Изучение возможностей задания на ней дополнительных δV показало, что для сохранения общей плавности обводов уменьшение объема на втором участке предпочтительнее выполнить за счет расширения участка, а не снижения площадей шпангоутов в его прежних границах. Такая возможность появляется, так как теперь на втором участке требуется задать только отрицательную величину δV . В целом, пересмотр участков на каждом новом шаге вполне допустим, так как принимается новая исходная форма корпуса.

Модификации безразмерной строевой по шпангоутам показаны на рис. 3.20, соответствующие трансформации проекции «корпус» показаны на рис. 3.21. Основные геометрические характеристики начального и модифицированных вариантов корпуса представлены в табл. 3.3.

Для 3D моделей 6 и 7 было выполнено численное моделирование обтекания в натурном масштабе при скорости 13 узлов ($Fr = 0.182$). Полученные значения сопротивления моделей представлены в табл. 3.4 и на рис. 3.22.

Таблица 3.3 – Характеристики 3D моделей (второй шаг)

Характеристики объектов		Исходная форма	Результат 1-го шага	1-й участок	2-й участок
3D модель №		0	5	6	7
Знак δV				+	-
Длина по КВЛ, L_{WL}	м	137.764			
Ширина, B	м	16.500			
Осадка по КВЛ, T	м	4.600			
Водоизмещение, ∇	м ³	9325.8	9326.6	9334.1	9318.3
Смоченная поверхность, S	м ²	3271.6	3272.7	3274.7	3270.8
Абсцисса ЦВ, X_{CB}	м	1.695	1.707	1.760	1.653
Апplikата ЦВ, KB	м	2.373			
Коэф-т общей полноты, C_B	-	0.892	0.892	0.893	0.891
Коэф-т полноты миделя, C_M	-	0.994			
Коэф-т полноты КВЛ, C_W	-	0.965	0.967	0.968	0.966
Коэф-т продольной полноты, C_P	-	0.897	0.897	0.898	0.896
Коэф-т вертикальной полноты, C_V	-	0.921	0.922	0.923	0.922

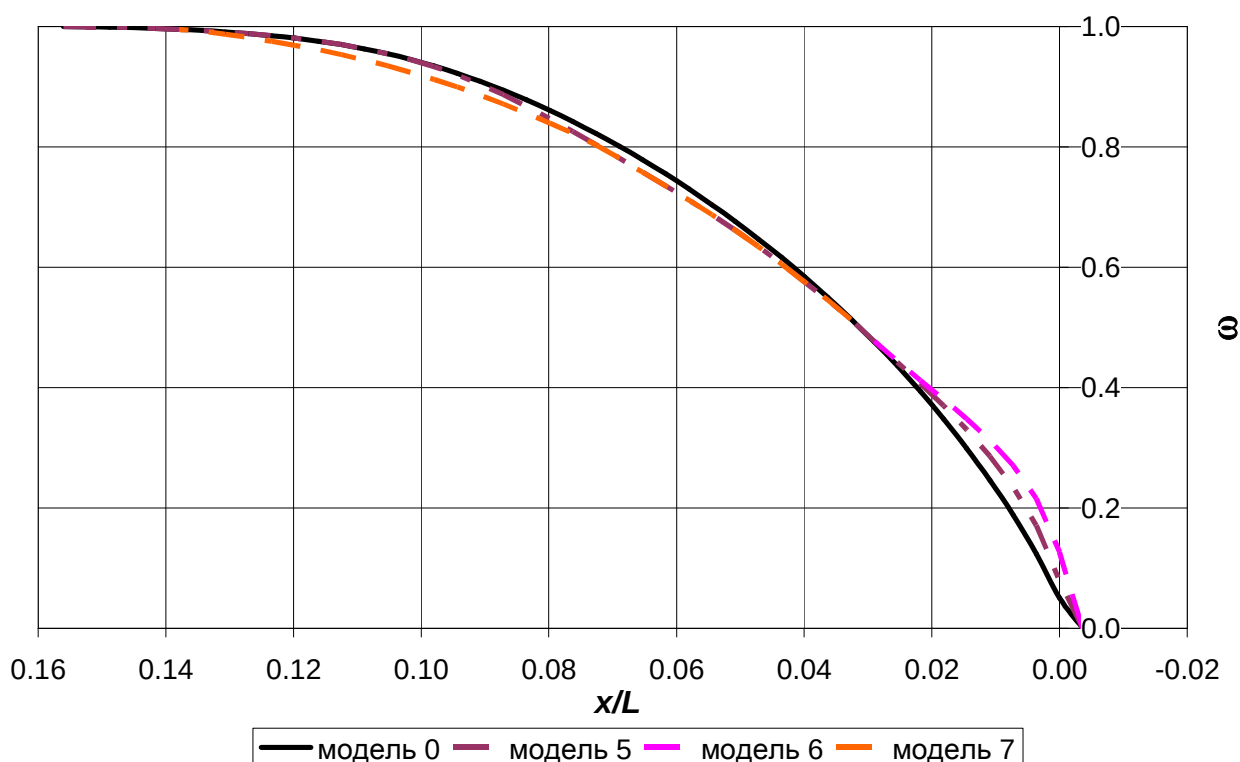


Рисунок 3.20 – Изменения строевой по шпангоутам (второй шаг)

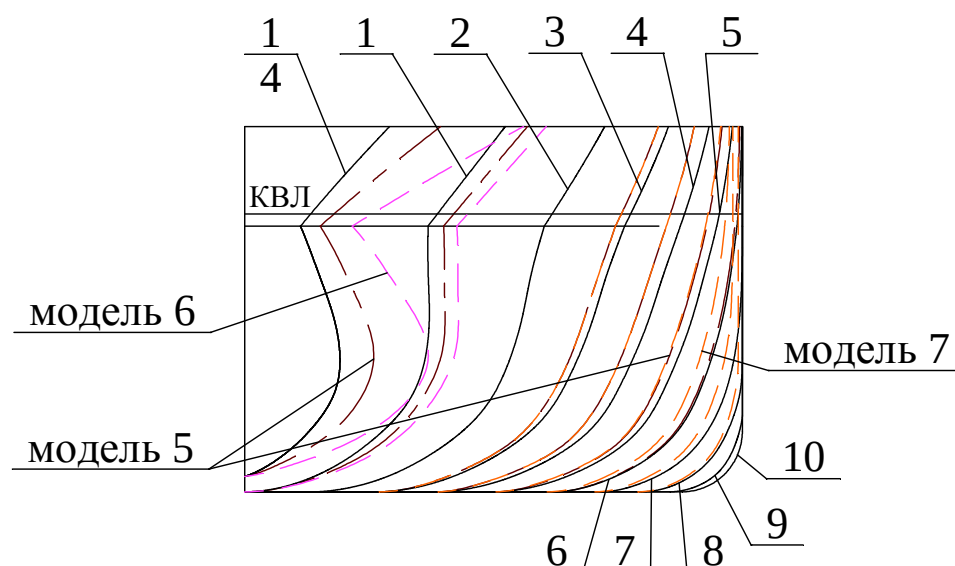


Рисунок 3.21 – Трансформации корпуса (второй шаг)

Таблица 3.4 – Сопротивление 3D моделей (второй шаг)

Характеристики объектов		Исходная форма	Результат 1-го шага	1-й участок	2-й участок
3D модель №		0	5	6	7
Знак δV				+	-
Полное сопротивление корпуса, R_T	кН	236.9	229.4	229.5	225.8
Сопротивление давления, R_P	кН	113.5	106.5	106.9	105.9
Сопротивление трения, R_F	кН	123.4	122.9	122.6	119.9

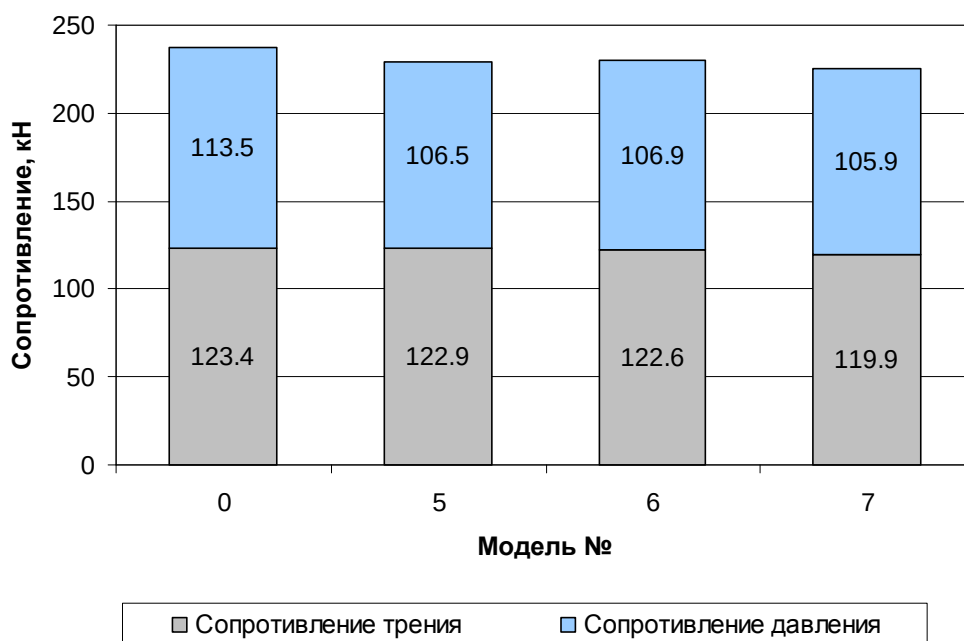


Рисунок 3.22 – Буксировочное сопротивление 3D моделей (второй шаг)

Согласно результатам численного моделирования, изменения затронули на этот раз не только сопротивление давления, но и трения. У модели 7 с заострением второго участка сопротивление трения заметно снизилось, по-видимому, из-за изменений линий тока вблизи скулы.

Обработка результатов второго шага показана на рис. 3.23. Для построения точек в левой части графика использовались результаты, полученные на первом шаге алгоритма по моделям 1 и 4.

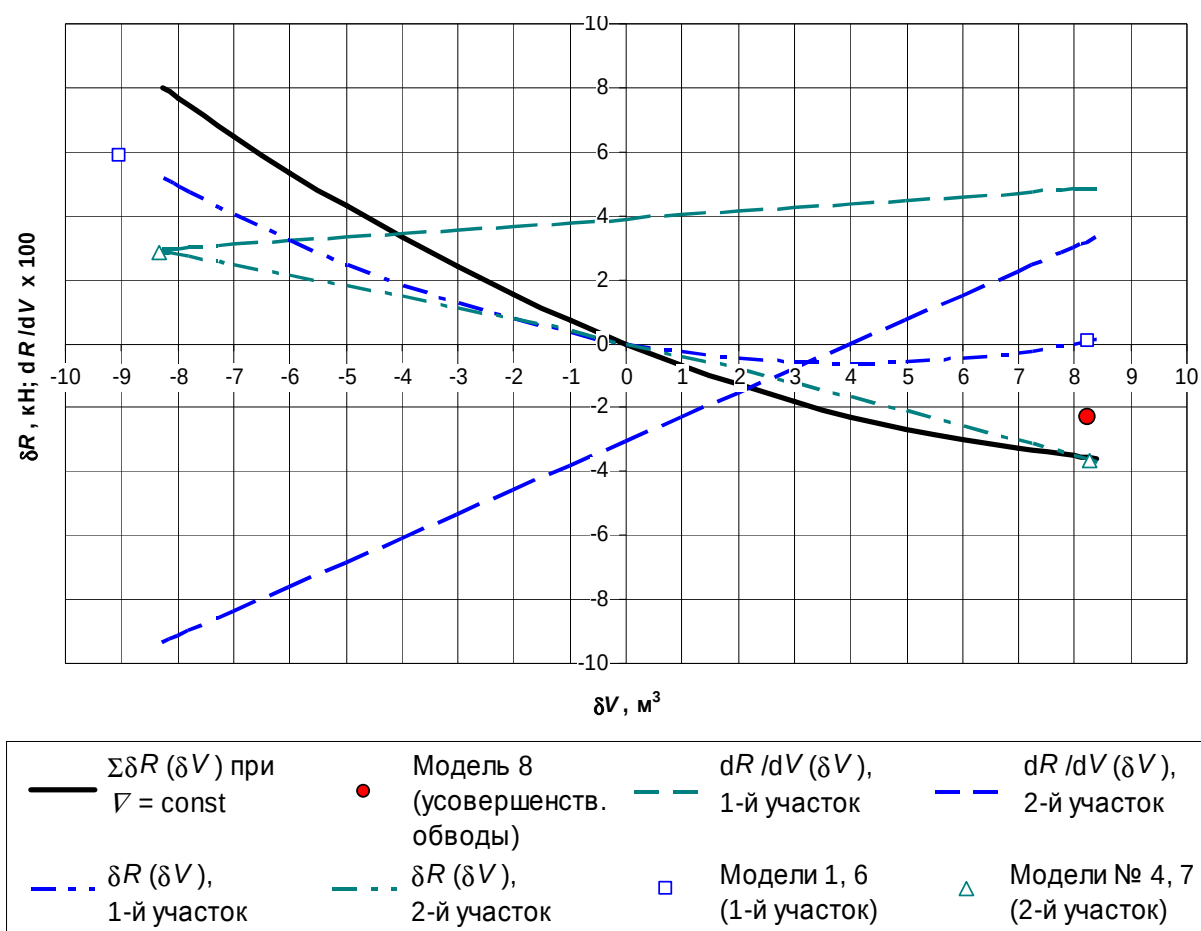


Рисунок 3.23 – Обработка результатов (второй шаг)

Максимальный выигрыш в полном сопротивлении корпуса получается, как и по результатам первого шага, при переносе всего заданного δV со второго участка на первый (правая граница графика на рис. 3.23). Оценка выигрыша относительно исходного корпуса (модель 0) составила 11.03 кН или 4.7%, относительно исходного корпуса второго шага (модель 5) – 3.58 кН или 1.6%. Численное моделирование по модели 8 с усовершенствованными обводами,

подготовленной по результатам второго шага, показало снижение сопротивления относительно исходного корпуса (модель 0) на 9.45 кН или на 4.1%.

По результатам второго шага условие (3.12) еще выполняется, поскольку было получено дополнительное снижение сопротивления по сравнению с первым шагом. Однако обработка результатов на рис. 3.23 показывает, что дальнейшие шаги малоперспективны. В задаче рассматривается всего два участка, поэтому зависимость суммарного изменения сопротивления от приращения водоизмещения $\sum \delta R(\delta V)$ представляет собой функцию одной переменной, которая легко визуализируется и поддается анализу. Из рис. 3.23 видно, что на правой границе рассмотренного диапазона, где находится результат второго шага, эта функция приближается к минимуму.

Так как в результате второго шага снижение сопротивления дополнительно к результату первого шага составило всего около 1%, дальнейшие шаги неперспективны, прежде всего, по практическим соображениям. Оценка ситуации с теоретических позиций выполнена ниже.

3.3.4. Анализ функционирования метода

Результаты применения АСФ показали, что заложенная в него гипотеза о независимости влияния разных участков корпуса по длине на волновое сопротивление позволяет вполне удовлетворительно прогнозировать изменения в полном сопротивлении корпуса. Снижение сопротивления по отношению к прогнозу этой величины в сумме за два шага составило 79%.

Обработка результатов второго шага (рис. 3.23) содержит важную информацию о поведении реконструированных зависимостей $\delta R(\delta V)$ и их производных $\lambda(\delta V)$. В отличие от первого шага (рис. 3.19), где λ имели разные значения и даже знаки, на втором шаге значения λ сблизились. На правой границе исследованного диапазона по δV , вблизи максимального выигрыша в сопротивлении, значения λ максимально близки. Очевидно, что показанные на рис. 3.23 зависимости $\lambda(\delta V)$ двух участков пересекутся недалеко за границей диапазона, то есть там имеется точка, где $\lambda_1 = \lambda_2$.

Чтобы более наглядно проиллюстрировать эти выводы, на рис. 3.24 в одной системе координат, аналогичной рис. 3.19 и рис. 3.23, совместно представлены результаты обоих шагов. Зависимости $\delta R = f(\delta V)$ на основе четырех точек для каждого участка аппроксимированы кубическими параболой. Соответственно, их производные $\lambda(\delta V)$ построены в виде квадратных парабол. Нулевая точка соответствует исходной форме корпуса.

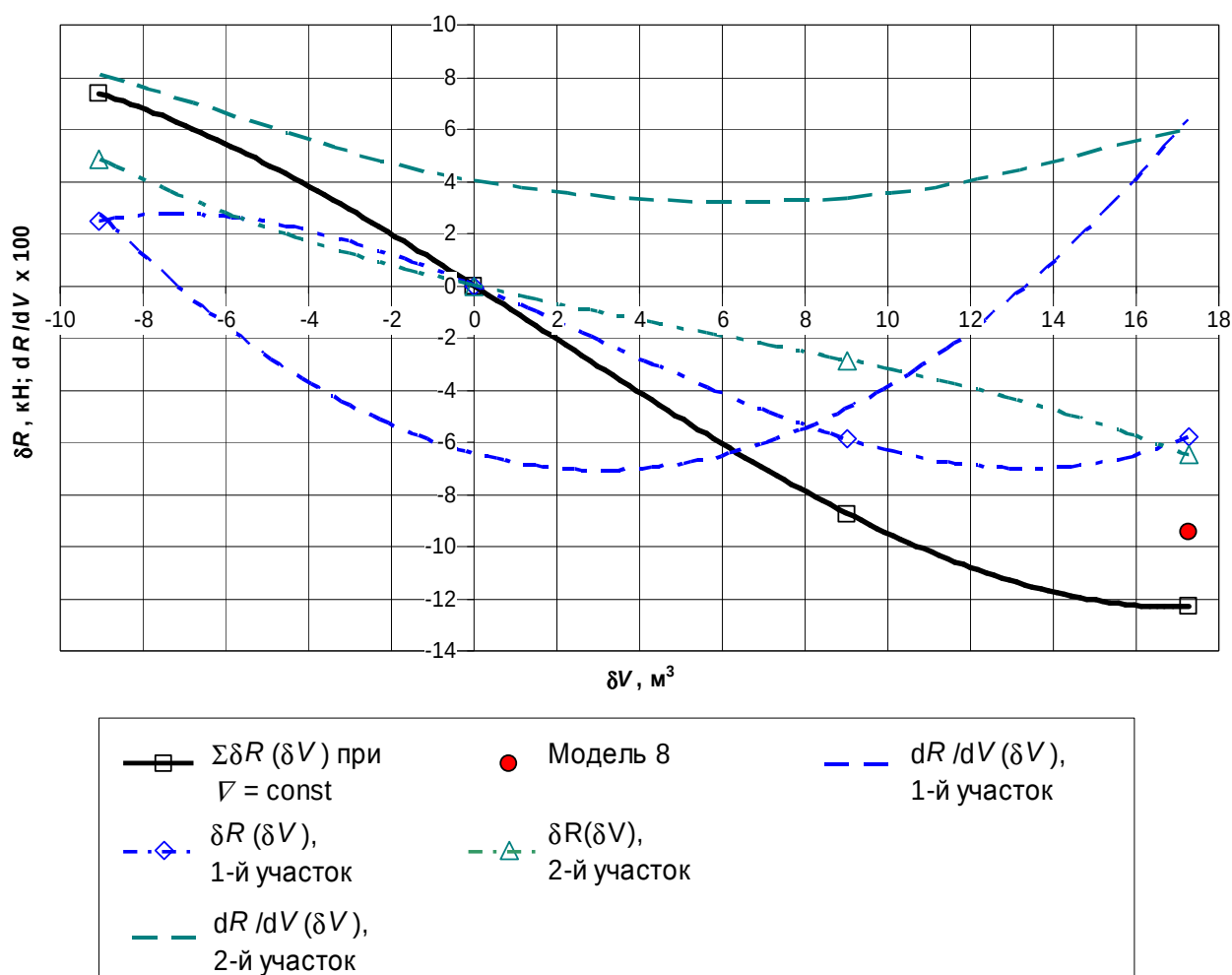


Рисунок 3.24 – Обработка двух шагов алгоритма в одних осях

На рис. 3.24 зависимости $\lambda(\delta V)$ из-за другой аппроксимации пересекаются уже в пределах исследованного диапазона. Эта точка соответствует минимуму кривой суммарного изменения сопротивления $\Sigma \delta R(\delta V)$. Характер кривых $\delta R = f(\delta V)$ для двух участков позволяет легко объяснить положение точки минимума. Очевидно, в этой точке скорость роста сопротивления на первом участке строго равна скорости его падения на втором.

Представленные данные хорошо соответствуют теоретическим сведениям о судне минимального волнового сопротивления, заданного точками судовой поверхности, которые использовались в исследовании В.Г. Сизова [60]. У такого судна значения λ во всех точках одинаковы. Аналогично, в нашем случае у судна с минимальным полным сопротивлением значения λ на обоих трансформируемых участках оказались, с поправкой на некоторую неточность аппроксимации, одинаковыми.

Таким образом, изучение функций $\lambda(\delta V)$ в исследуемом диапазоне может использоваться для анализа хода решения задачи. Судя по полученным результатам, при работе с конечными δV эта информация все же носит вспомогательный характер по сравнению с условием (3.12). Это обосновано тем, что в выполненном исследовании зависимости $\lambda(\delta V)$ по сравнению с $\delta R(\delta V)$ носили труднопредсказуемый характер. При изменениях δV , соответствующих относительно небольшому δR , значения λ менялись настолько существенно, не только по величине, но и по знаку, что по ним было бы трудно прогнозировать выгодное направление трансформаций.

Также нужно учитывать, что при пошаговой реконструкции функций на ограниченных диапазонах ближайший минимум сопротивления может оказаться локальным. В пределах более широкого диапазона условие $\lambda = \text{const}$ может выполняться неоднократно.

В целом представляется, что возможности предложенного АСФ прежде всего связаны с обширностью исследуемых диапазонов трансформаций корпуса и детальностью реконструкции в них зависимостей $\delta R(\delta V)$, то есть с размерами участков и величинами δV . По-видимому, сверху эти параметры в большинстве случаев жестко ограничены принципами геометрии судовых форм и общепроектными требованиями.

Анализ работы оптимизационного алгоритма позволил сделать важный вывод о его адекватности и продуктивности. Основной прогресс был получен уже на первом шаге. Результат первого шага составляет около 75% общего выигрыша в сопротивлении. На втором шаге были получены лишь дополнительные 25%.

Продуктивность алгоритма также тесно связана с величиной и способом задания δV . Выбор сравнительно больших (максимально допустимых для сохранения судовой формы и неизменных общепроектных показателей) размеров участков и величин δV оказался оправданным. Очевидно, что при работе с меньшими конечными приращениями, тем более с отдельными точками судовой поверхности, для получения существенного выигрыша в сопротивлении пришлось бы сделать гораздо больше шагов. Следовательно, размеры участков и величины δV имеют естественное ограничение и снизу.

3.3.5. Анализ полученных результатов

Окончательные результаты совершенствования носовых обводов ССП соответствуют результатам второго шага алгоритма. За счет перераспределения объема между двумя участками носовой оконечности было получено снижение буксировочного сопротивления корпуса на 9.75 кН или 4.1%. Теоретический чертеж носовой части, в которой реализованы соответствующие трансформации, представлен в Приложении В на рис. В.5 и рис. В.6. Общая протяженность трансформированного участка составила 14% длины по ватерлинии.

Анализ волновой системы у носовой оконечности, где менялись обводы, показал, что снижение сопротивления сопровождается заметным усилением расходящихся волн и ослаблением поперечных – рис. 3.25.

На рис. 3.25, где показана визуализация свободной поверхности изолиниями уровня при $Fr = 0.18$, влияние совершенствования носовых обводов хорошо заметно по второй и третьей вершинам поперечных волн (считая от форштевня), а особенно – по второй впадине поперечной волны (этот район выделен на рис. 3.25 красной рамкой). У исходных обводов, начиная с этого района, формируется единая носовая волна с основным вкладом поперечного компонента. У усовершенствованных обводов более мощные расходящиеся волны и явно ослаблен поперечный компонент.

Выигрыш в 4.1% сопротивления корпуса является сравнительно небольшим, поэтому интересен вопрос о том, насколько он распространяется на другие Fr . Для корпусов с исходными и усовершенствованными обводами было

выполнено численное моделирование в диапазоне $Fr = 0.14 \div 0.18$. Полученные в результате кривые буксировочного сопротивления и коэффициента остаточного сопротивления показаны на рис. 3.26.

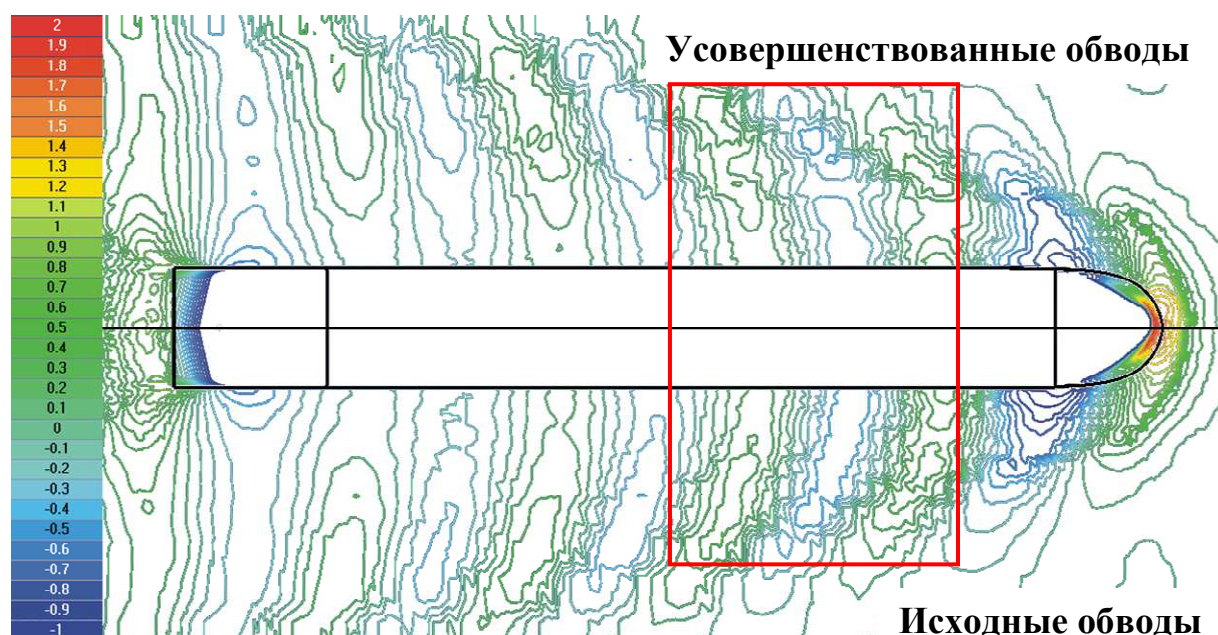


Рисунок 3.25 – Визуализация свободной поверхности изолиниями уровня (шкала в м)

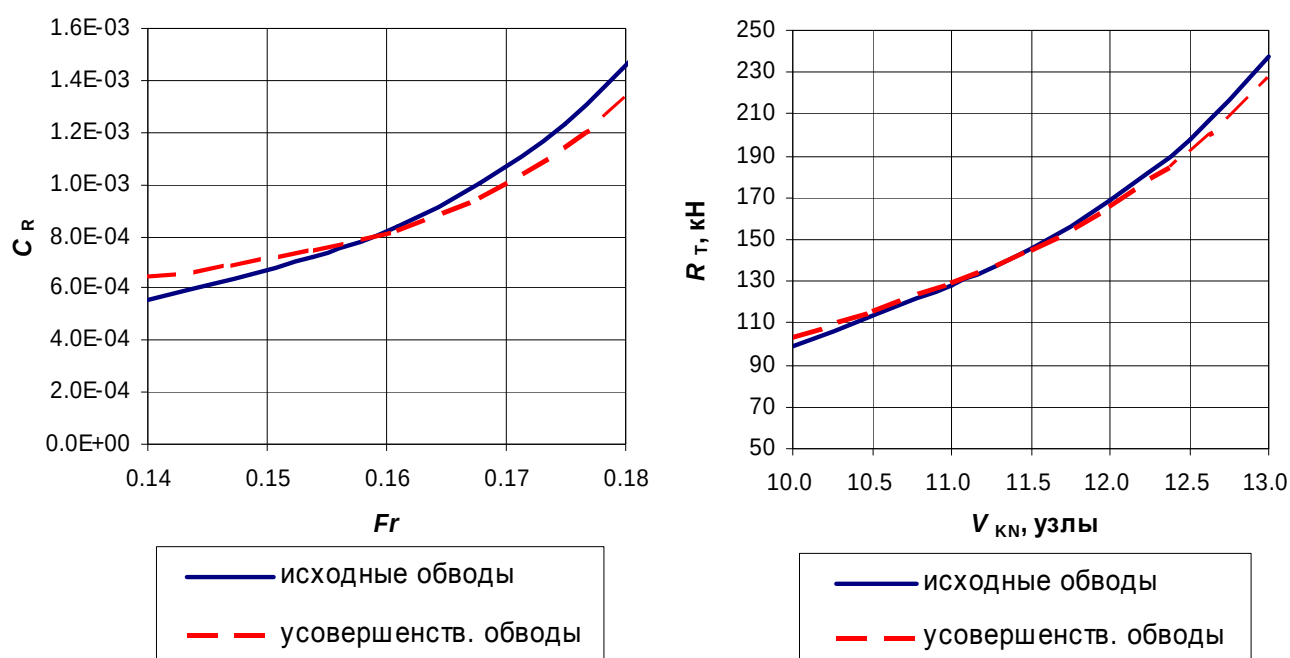


Рисунок 3.26 – Сопротивление исходного и усовершенствованного корпусов

Из рис. 3.26 видно, что сопротивление снизилось и в некотором диапазоне более низких скоростей. Вместе с тем, кривые носят ярко выраженный

оптимизационный характер – снижение сопротивления при высоких Fr сопровождается его ростом при низких Fr .

Кроме влияния Fr на особенности формирования волнового сопротивления, существенную роль играет и то, что при низких Fr доля волнового сопротивления у данного тихоходного судна резко снижается и становится незначительной. Поэтому оптимизационный характер кривых вызван не только влиянием обводов на волновую составляющую, но и на вязкостную, причем эти составляющие находятся в противоречии.

Эти процессы лучше иллюстрируются рис. 3.27, на котором показаны зависимости волнового сопротивления R_w и сопротивления формы R_{PV} от Fr для исходных и усовершенствованных обводов. Сопротивление формы R_{PV} здесь получено как сопротивление давления дублированной модели.

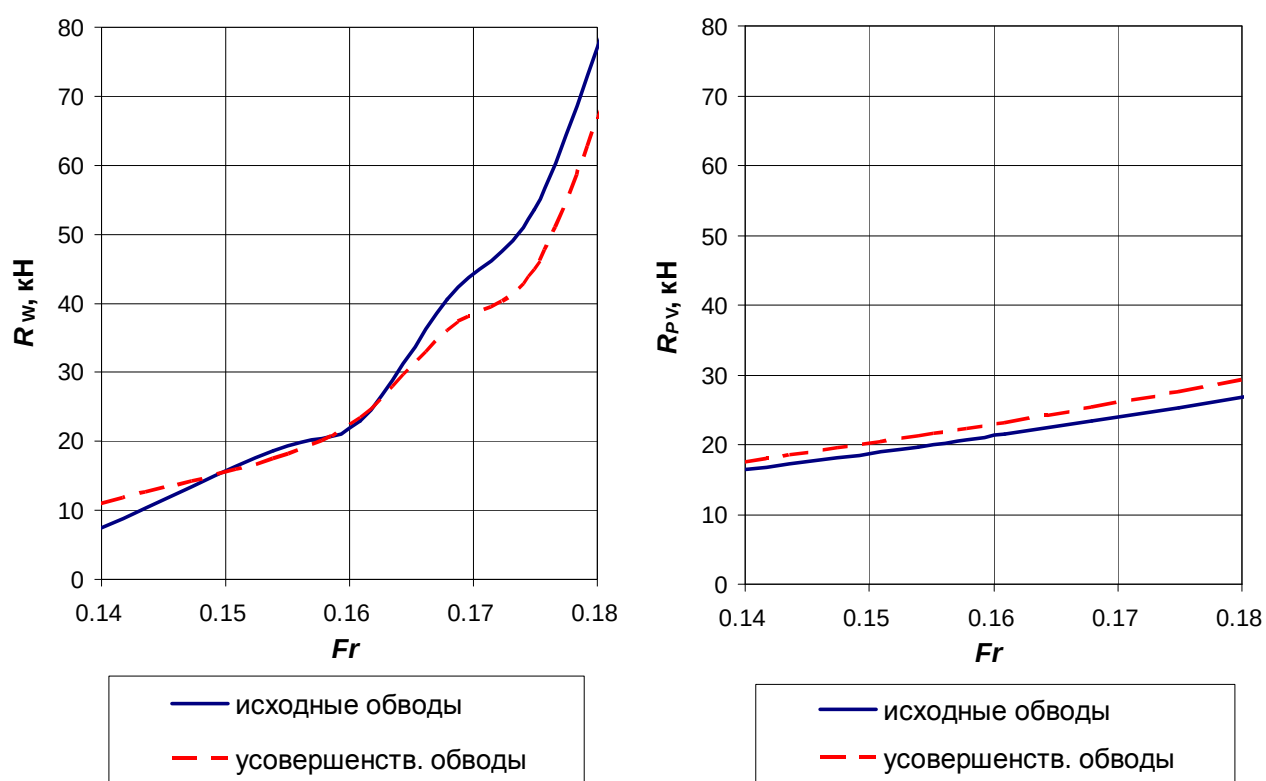


Рисунок 3.27 – Компоненты сопротивления давления исходного и усовершенствованного корпусов

3.3.6. Практическое решение при модернизации существующих судов

Результаты исследования показали, что при заданных исходных обводах выгодно не только перераспределять водоизмещение при условии $\nabla = \text{const}$, но и

просто увеличивать полноту вблизи форштевня. Особенно большой выигрыш был получен при положительной величине δV на первом участке после первого шага алгоритма. Это позволяет локализовать выгодные изменения в небольшом районе, что может оказаться полезным при модернизации существующих судов.

На основе этой информации был подготовлен проект бульбовой наделки, которая при минимальных объемах работ может быть установлена на существующих судах с носовыми обводами, рассмотренными в настоящей работе. Эскиз наделки показан на рис. 3.28, теоретический чертеж носовой части с наделкой представлен в Приложении В на рис. В.7 и рис. В.8. Район установки наделки составляет всего 2% длины по ватерлинии исходного корпуса.

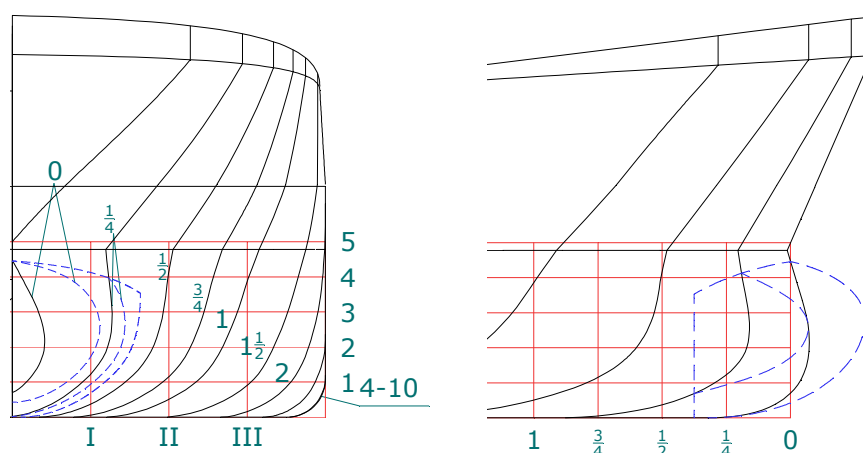


Рисунок 3.28 – Бульбовая наделка на носовую оконечность с исходными обводами

Результаты численного моделирования обтекания корпуса с бульбовой наделкой показали (рис. 3.29), что ее установка дает больший выигрыш в сопротивлении (5.6% при $Fr = 0.18$), чем усовершенствованные обводы, причем на более широком диапазоне Fr . Рост положительного эффекта можно объяснить отказом от ограничения на форму ДП. Выбранная с учетом соображений размещения и технологичности форма наделки существенно увеличивает выдвиг бульба за НП. Это способствует дополнительному снижению сопротивления формы, которое компенсирует неполный выигрыш в волновом сопротивлении при высоких Fr из-за отказа от выгодных изменений в остальной части носовой оконечности – рис. 3.30.

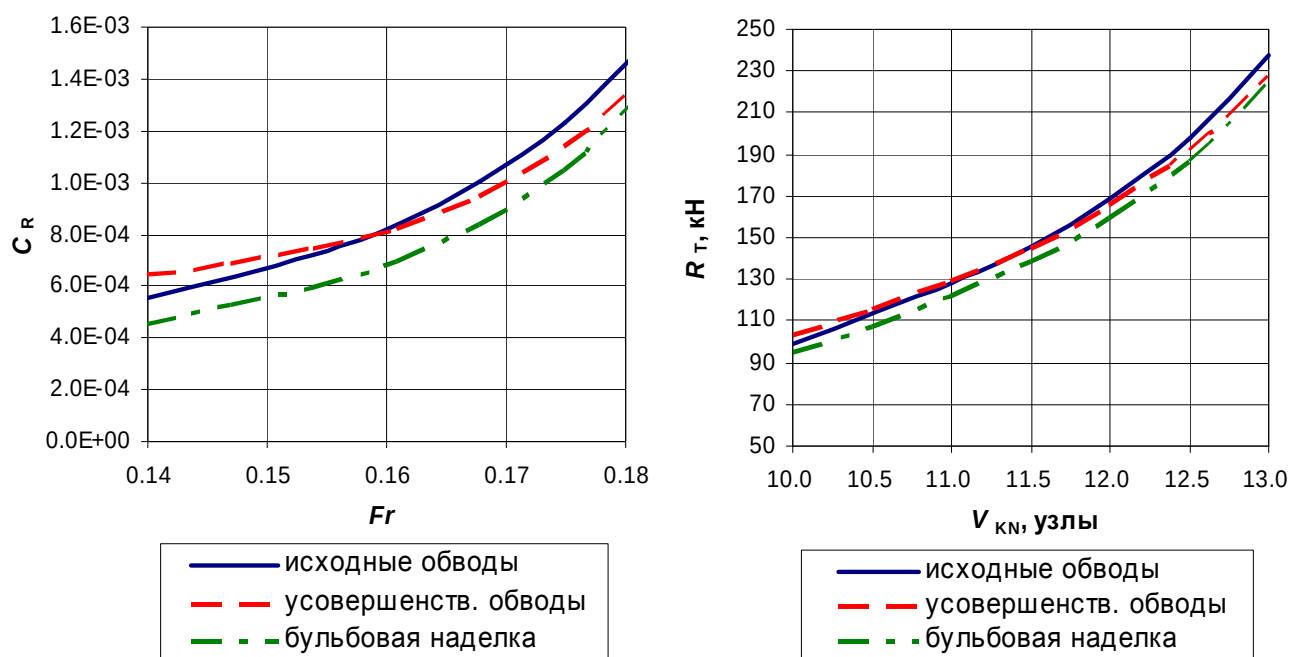


Рисунок 3.29 – Сопротивление корпусов с учетом данных по бульбовой наделке

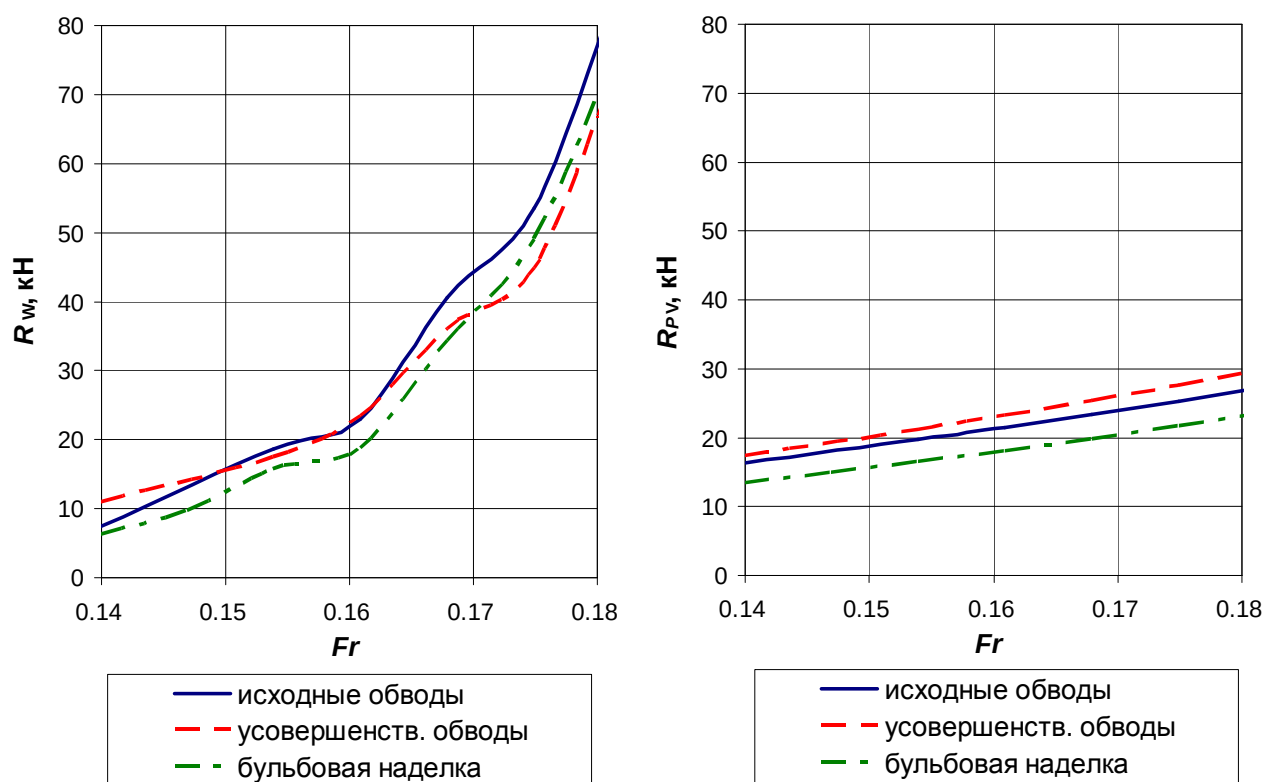


Рисунок 3.30 – Компоненты сопротивления давления корпусов с учетом данных по бульбовой наделке

3.4. Совершенствование обводов морского судна умеренной полноты и быстроходности KCS

3.4.1. Объект исследования

Объект исследования представлен выше в пункте 2.3.1, где изложены результаты численного моделирования его обтекания как эталонного судна. Основные элементы теоретического чертежа (главные размерения) в масштабах модели и натуре представлены в табл. 2.1. Теоретический чертеж представлен в Приложении В на рис. В.1 и рис. В.2. Все расчеты в рамках задачи совершенствования обводов выполнены в натурном масштабе.

3.4.2. Результаты исследования

С учетом данных, полученных при совершенствовании обводов ССП (подраздел 3.3), для максимально эффективного достижения практически значимых результатов был предусмотрен один шаг АСФ с крупными величинами δV . С помощью МСТ в носовой оконечности на трех участках были заданы δV величиной около 0.4% объемного водоизмещения разного знака, что дало шесть новых вариантов обводов. Для объекта – магистрального контейнеровоза – форма палубы является одним из основных проектных элементов, поэтому модификации выполнялись при условии ее постоянства с помощью расширенной МСТ (см. пункт 3.1.2).

Модификации безразмерной строевой по шпангоутам показаны на рис. 3.31, соответствующие трансформации проекции «корпус» показаны на рис. 3.32 (носовая оконечность по длине разбита на 10 условных шпаций). Основные геометрические характеристики начального и модифицированных вариантов корпуса представлены в табл. 3.5.

Для 3D модели исходной формы и моделей с трансформациями было выполнено численное моделирование обтекания в натурном масштабе при скорости 26 узлов ($Fr = 0.282$) в постановке с фиксацией посадки в начальном положении. Полученные значения сопротивления моделей представлены в табл. 3.6 и на рис. 3.33.

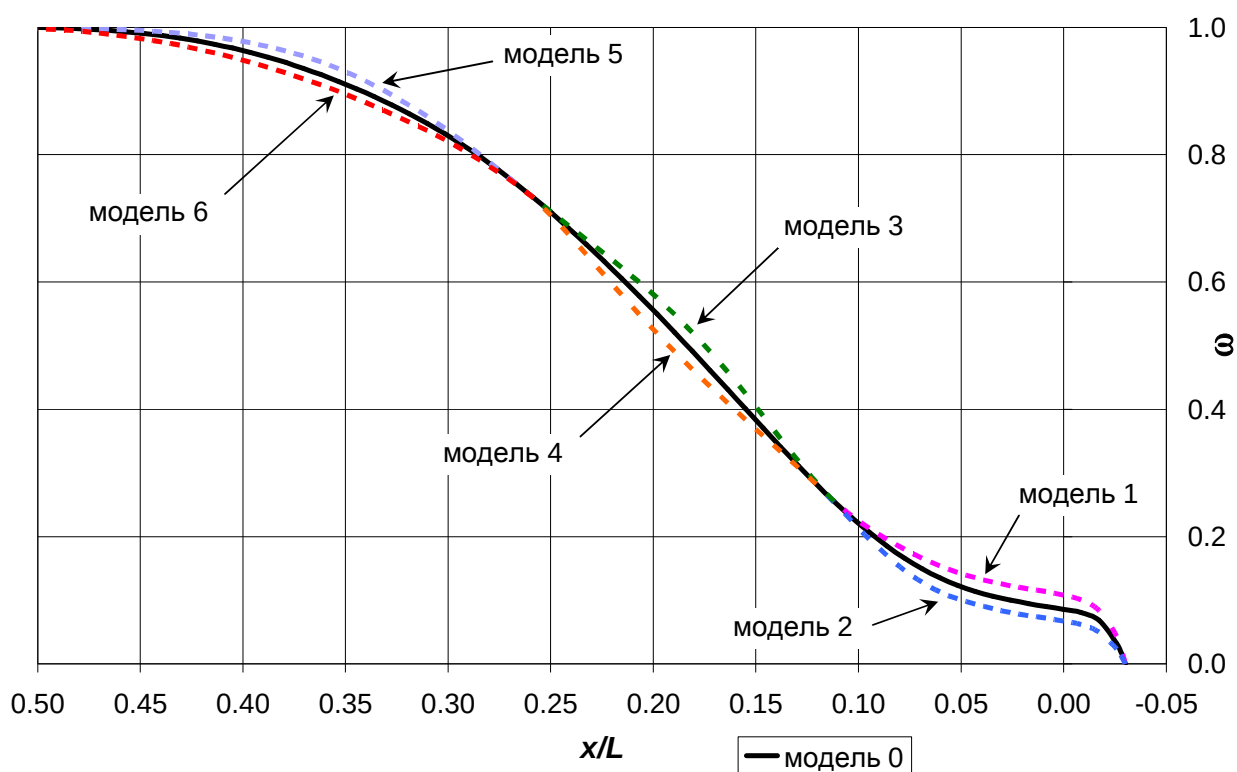


Рисунок 3.31 – Изменения строевой по шпангоутам

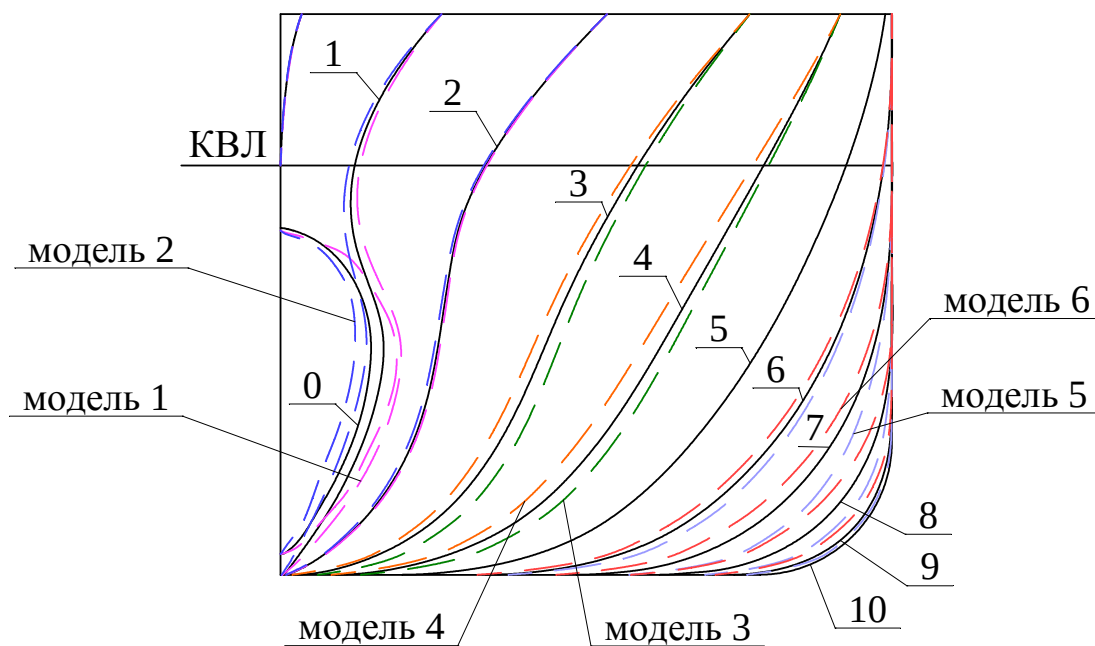


Рисунок 3.32 – Трансформации корпуса

Таблица 3.5 – Характеристики 3D моделей

Характеристики объектов		Исходн. форма	1-й участок		2-й участок		3-й участок	
3D модель №		0	1	2	3	4	5	6
Знак δV			+	-	+	-	+	-
Длина по КВЛ, L_{WL}	м	232.145						
Ширина, B	м	32.200						
Осадка по КВЛ, T	м	10.800						
Водоизмещение, ∇	м ³	52038	52222	51849	52223	51844	52219	51838
Смоченная поверхность, S	м ²	9540	9570	9513	9556	9524	9567	9512
Абсцисса ЦВ, X_{CB}	м	-2.372	-1.975	-2.768	-2.097	-2.644	-2.253	-2.488
Аппликата ЦВ, $\overline{KB}$	м	5.907	5.904	5.910	5.902	5.910	5.895	5.920
Коэф-т общей полноты, C_B	-	0.645	0.647	0.642	0.647	0.642	0.647	0.642
Коэф-т полноты миделя, C_M	-	0.985						
Коэф-т полноты КВЛ, C_W	-	0.824	0.824	0.823	0.825	0.822	0.824	0.823
Коэф-т продольной полноты, C_P	-	0.654	0.657	0.652	0.657	0.652	0.657	0.652
Коэф-т вертикальной полноты, C_V	-	0.783	0.785	0.780	0.784	0.781	0.785	0.780

Таблица 3.6 – Сопротивление 3D моделей

Характеристики объектов		Исходная форма	1-й участок		2-й участок		3-й участок	
3D модель №		0	1	2	3	4	5	6
Знак δV			+	-	+	-	+	-
Полное сопротивление корпуса, R_T	кН	2634	2486	2687	2686	2463	2599	2591
Сопротивление давления, R_P	кН	1307	1157	1366	1357	1136	1271	1268
Сопротивление трения, R_F	кН	1327	1329	1321	1329	1327	1329	1323

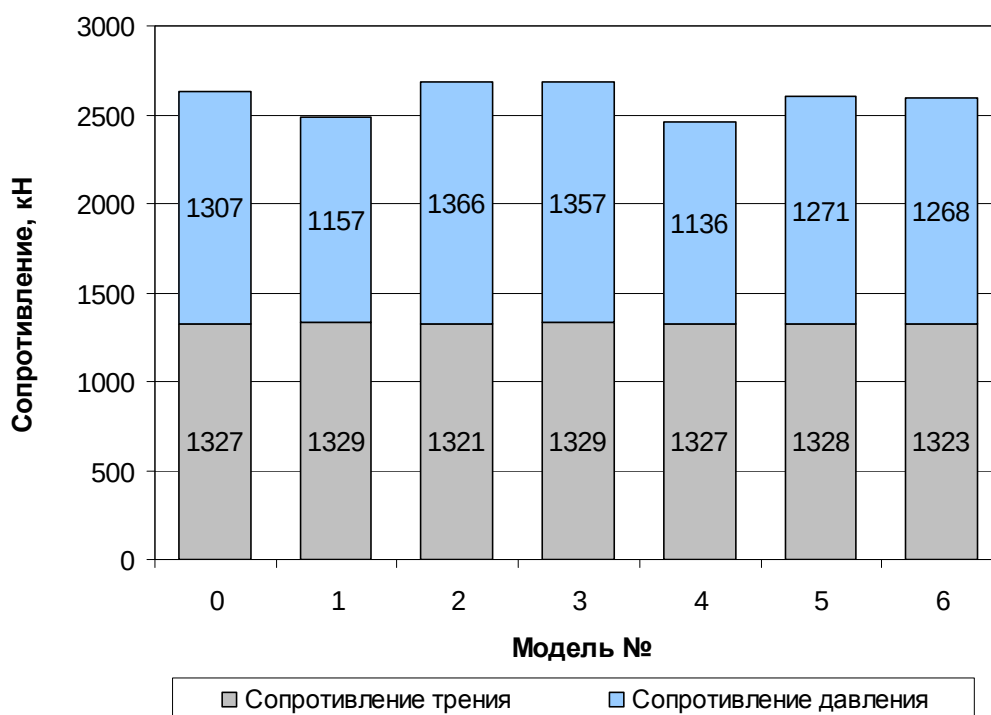


Рисунок 3.33 – Соппротивление 3D моделей

Согласно результатам расчетов, вариации формы соответствуют колебаниям полного сопротивления корпуса разного знака, величиной 1.3-6.5%. Колебания произошли почти исключительно в составляющей давления.

Влияние знака δV на сопротивление по характеру не одинаково на разных участках. На первом участке (ближе к форштевню) увеличение объема приводит к снижению сопротивления. На втором участке между водоизмещением и сопротивлением прямая зависимость. На третьем участке как увеличение, так и уменьшение объема корпуса приводит к небольшому снижению сопротивления.

Обработка результатов в виде зависимостей $\delta R(\delta V)$ и их производных $\lambda = dR / dV(\delta V)$ показана на рис. 3.34. При числе участков больше двух суммарное изменение сопротивления $\sum \delta R(\delta V)$ при $V = \text{const}$ нельзя отобразить в двух измерениях, поэтому, в отличие от рис. 3.19, рис. 3.23 и рис. 3.24 (исследование ССП), на рис. 3.34 оно отсутствует, а представленные зависимости построены в соответствии с реальным знаком δV .

При наличии в задаче трех участков полученный диапазон $\sum \delta R(\delta V)$ еще может быть отображен в трех измерениях – рис. 3.35, на котором в качестве

аргументов использованы приращения δV на первом и втором участках. Приращения на третьем участке при $V = \text{const}$ рассмотрены в роли зависимой переменной (на рис. 3.35 не показаны).

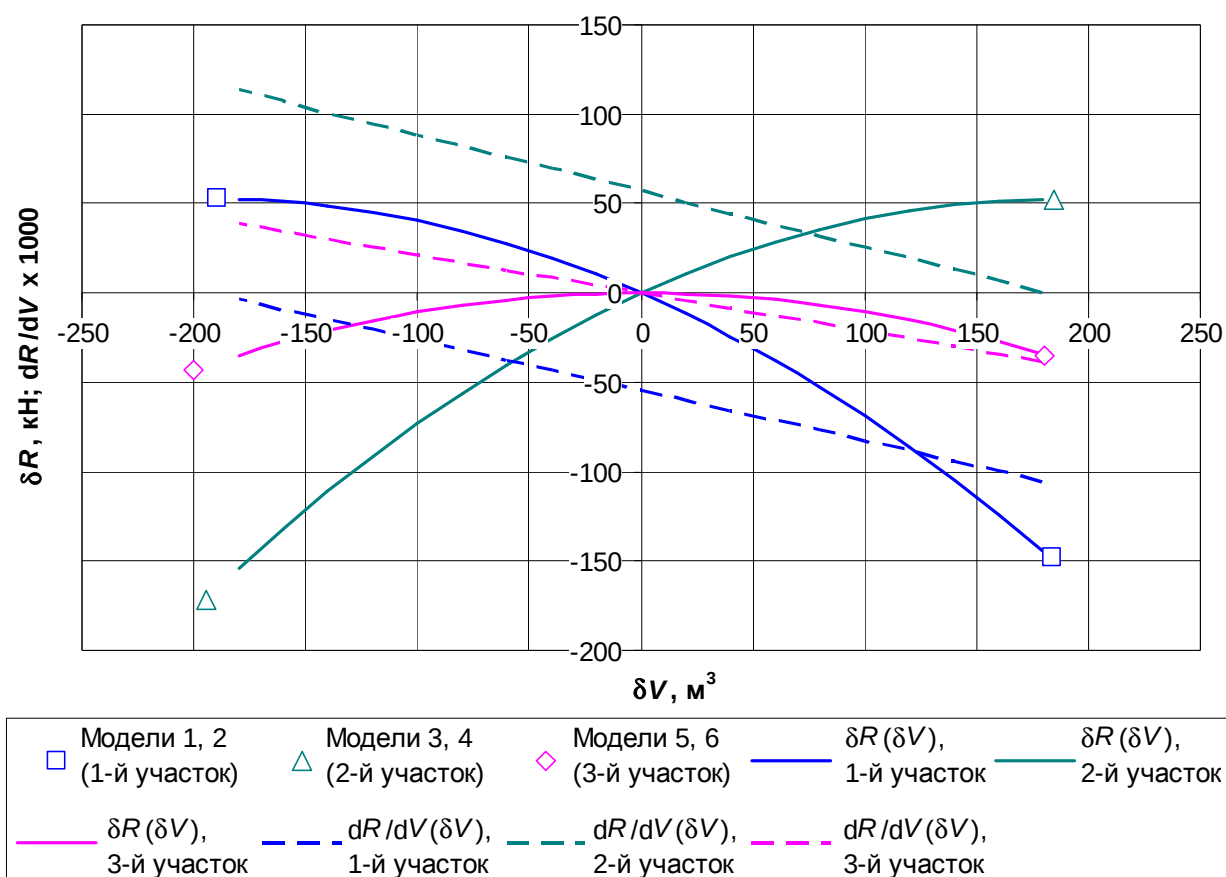


Рисунок 3.34 – Обработка результатов расчетов

Максимальный выигрыш в сопротивлении получается при переносе всего заданного δV со второго участка на первый (правый передний угол поверхности на рис. 3.35). Третий участок в такой комбинации не участвует, что объясняется его более слабым влиянием на сопротивление. Оценка выигрыша составила 319.8 кН или 12.1%. Численное моделирование по модели 7, в которой были реализованы соответствующие трансформации, показало снижение сопротивления на 243.4 кН или на 8.9%. Общая длина трансформированного участка составила 26% длины по ватерлинии.

Согласно обработке, выполнение дальнейших шагов АСФ выглядит перспективным – поверхность $\sum \delta R(\delta V)$ вблизи точки с лучшим результатом имеет значительный уклон. Для оценки хода решения задачи можно также

использовать анализ зависимостей $\lambda(\delta V)$ рассмотренных участков (см. пункт 3.3.4). Прямое сравнение значений λ в задаче с числом участков больше двух затруднено, поэтому предлагается рассмотреть дисперсию этих величин $s^2(\lambda)$ при $\nabla = \text{const}$, которая представлена на рис. 3.36 в осях, аналогичных рис. 3.35. Из рис. 3.36 видно, что дисперсия $s^2(\lambda)$ стремится к нулю в области рассмотренного диапазона, противоположной минимуму сопротивления (левый дальний угол поверхности). Сравнение с рис. 3.35 позволяет предположить, что в этой области лежит ближайший максимум сопротивления. В области же, которая прилегает к точке с минимальным сопротивлением, значения дисперсии максимальны. Поэтому по всем признакам следующий шаг АСФ является перспективным. Однако на практике это не подтвердилось, и получить дальнейшее снижение сопротивления не удалось. Причины рассмотрены в следующем пункте.

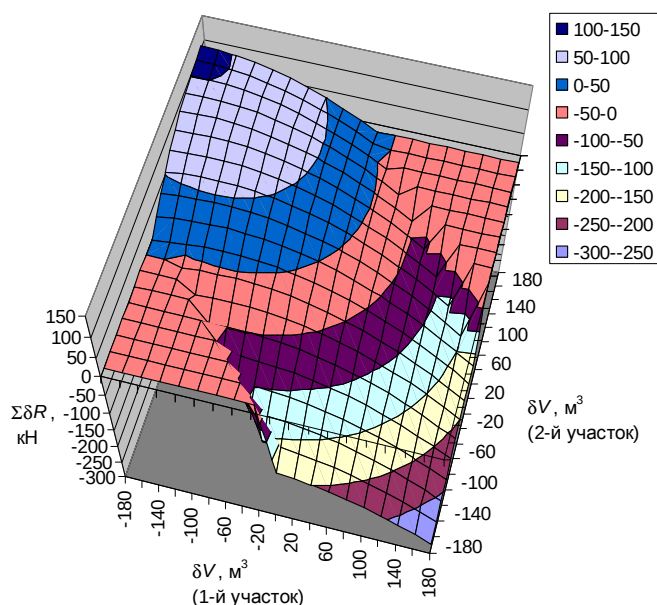


Рисунок 3.35 – Обработка результатов расчетов в трех измерениях

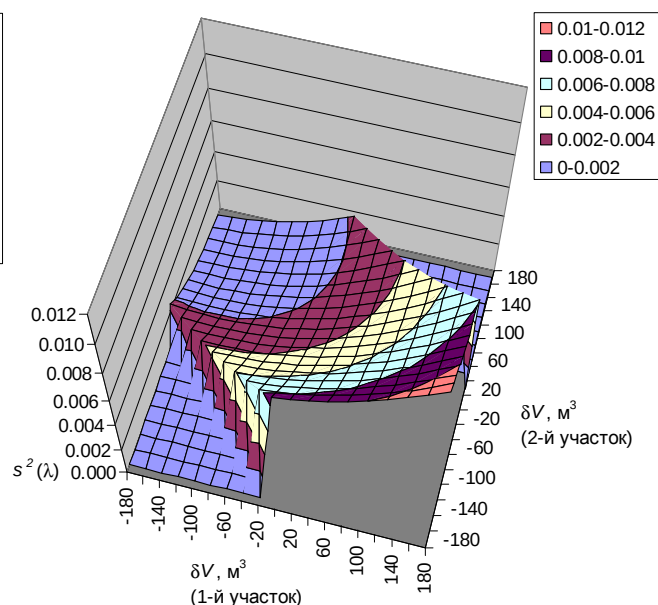


Рисунок 3.36 – Дисперсия $s^2(\lambda)$ при $\nabla = \text{const}$

3.4.3. Анализ функционирования метода

При анализе работы АСФ обращает на себя внимание снижение точности прогноза снижения сопротивления по сравнению с исследованием ССП из подраздела 3.3. В настоящем исследовании точность составила 73% за один шаг, тогда как в исследовании ССП – 79% за два шага.

Неточность прогноза может объясняться недостаточной адекватностью гипотезы о независимом влиянии разных участков корпуса по длине на волновое сопротивление условиям обтекания рассмотренного объекта.

Для оценки адекватности гипотезы в условиях конкретного объекта можно использовать несложный метод, заключающийся в составлении дополнительных комбинаций приращений δV на рассмотренных участках, которые не отвечают условию минимума сопротивления и могут не отвечать условию $\nabla = \text{const}$, но их сопротивление можно прогнозировать, а затем проверять прогнозы расчетами по соответствующим моделям.

Результаты таких расчетов показали, что точность каждого прогноза является высокой (не менее 85%) до тех пор, пока общий выигрыш в сопротивлении не достигает некоторой предельной величины, составляющей 8-9% полного сопротивления исходного объекта, что примерно соответствует результату первого шага АСФ. После этого дальнейшего снижения сопротивления не происходит, что проявляется как резкое снижение точности прогноза.

Ситуация нуждается еще в дальнейшем изучении. Ее вероятным объяснением является недостаточная подробность данных, использованных для построения аппроксимирующей зависимости $\sum \delta R(\delta V)$. Зависимость может иметь более сложный характер, чем выполненная по девяти значениям аппроксимация, которая не позволила выявить экстремум.

Однако, с практической точки зрения полученные результаты говорят о том, что с минимальным сопротивлением можно ассоциировать ряд модификаций, так как указанное уточнение аппроксимирующей зависимости требует относительно малых величин δV вблизи предполагаемого аналитического минимума. Как следствие, разница в сопротивлении соответствующих корпусов также будет невелика. В рассмотренном случае ее оценка находится в пределах 1%. По-видимому, в область практического оптимума попадают все варианты, по которым прогноз снижения сопротивления превышает определенную максимальную для данного случая величину.

Сделанные выше предположения содержат определенное сходство с выводами М.Г. Крейна [33] о бесконечном числе оптимальных форм, которые были сделаны по результатам математического исследования формулы Мичелла для волнового сопротивления, хотя в нем было также показано, что для надводных судов нельзя аналитически подобрать реальные функции формы, минимизирующие волновое сопротивление. Вопрос о том, в какой степени это связано с недостаточной полнотой теории Мичелла, остался открытым.

Представленные здесь выводы пока недостаточно полны и нуждаются в дальнейших исследованиях, выходящих за рамки работы.

3.4.4. Анализ полученных результатов

Анализ волновой системы судна показал, что снижение сопротивления сопровождается усилением расходящихся волн и ослаблением поперечных – рис. 3.37 (как и на рис. 2.8, сохранена система координат семинара «Гётеборг-2000»). Снижение перепадов давления в носовой части корпуса также указывает на снижение сопротивления – рис. 3.38.

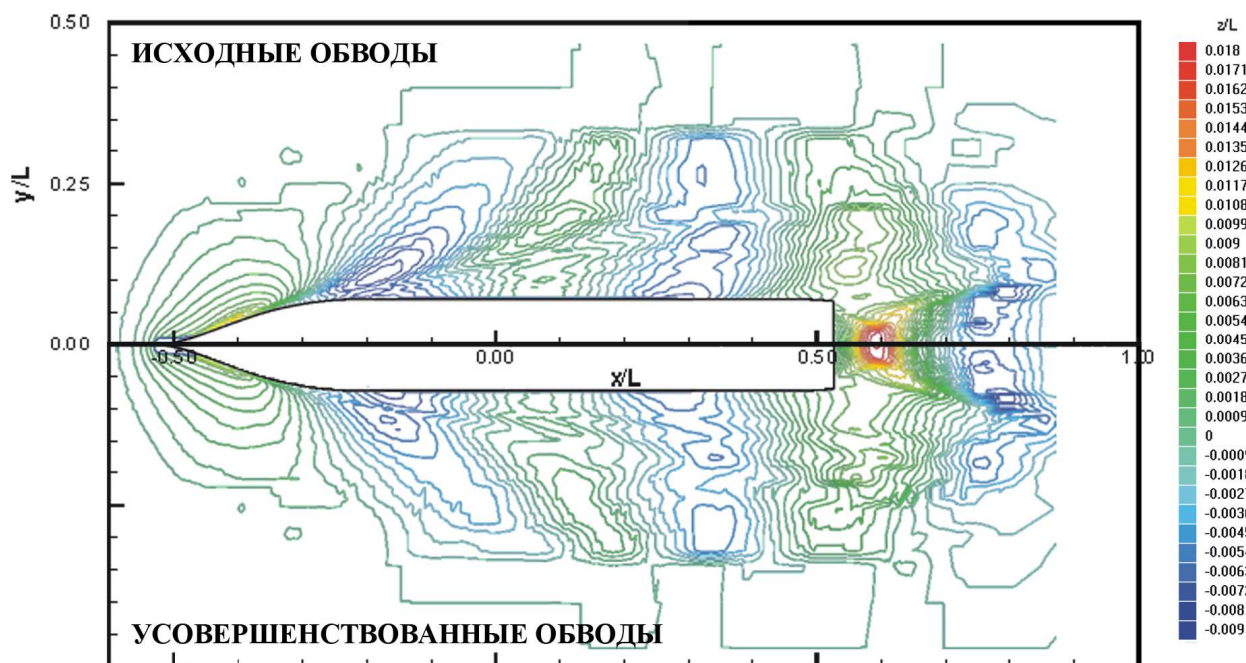


Рисунок 3.37 – Визуализация свободной поверхности изолиниями уровня

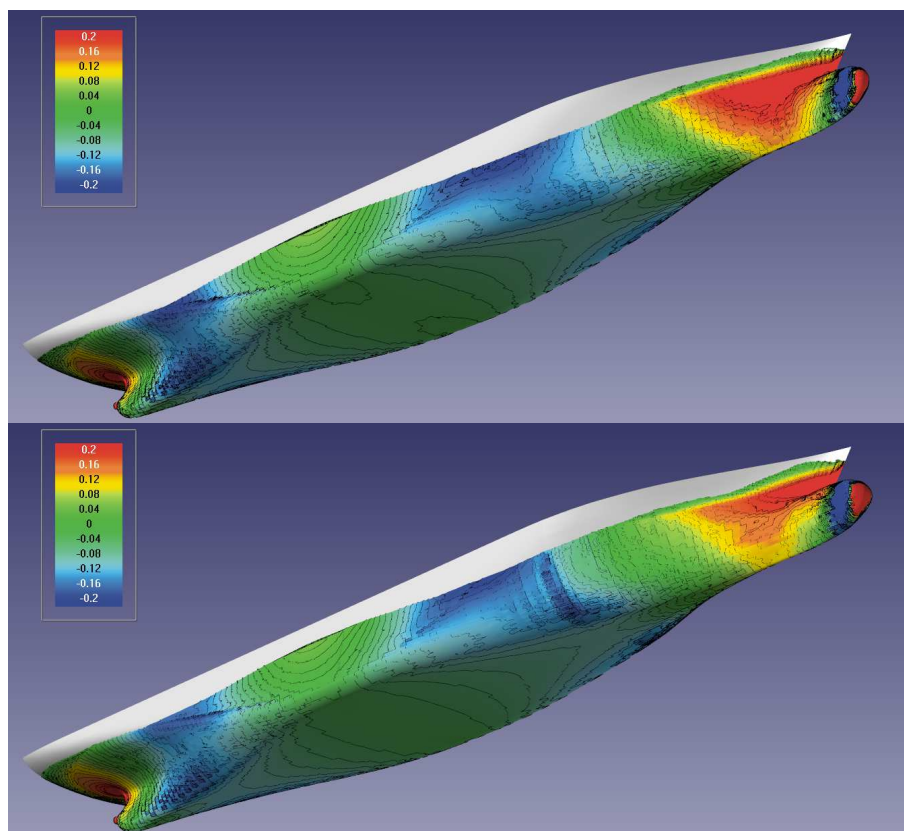


Рисунок 3.38 – Распределение коэффициента давления $p/(0.5\rho V^2)$ по поверхности корпуса: сверху исходная форма корпуса KCS, внизу – усовершенствованная

Модификации корпуса выполнялись при условии фиксации формы палубы с помощью расширенной МСТ (см. пункт 3.1.2), поэтому продольное перераспределение водоизмещения сопровождалось и некоторыми изменениями в его вертикальном распределении. Перенос водоизмещения в погруженный ниже действующей ватерлинии бульб, соответствующий увеличению водоизмещения на первом участке, мог оказать самостоятельное влияние на результаты.

Однако сравнение аппликат ЦВ показало, что у исходного и усовершенствованного корпусов они практически одинаковы, что объясняется взаимопротивоположным влиянием первого и второго участков на эту величину. Таким образом, вертикальное распределение полноты в целом не изменялось.

3.5. Выводы по разделу 3

Разработанный метод оптимальной трансформации носовой части судна полностью отражает концепцию, сформулированную при постановке задачи, и включает все компоненты, необходимые для его использования.

Эффективность метода продемонстрирована на примере двух объектов с разным характером обводов и быстроходностью. Были получены важные научные и практические результаты, требующие, тем не менее, дополнительного анализа.

Научная новизна результатов раздела состоит в следующем:

- **Впервые** предложена математическая модель систематических трансформаций формы корпуса, основополагающим принципом которой явилось использование локального коэффициента продольной полноты в качестве характеристики продольного распределения водоизмещения. Модель осуществляет варьирование величины и продольного распределения водоизмещения носовой части корпуса путем изменения ограниченных участков ее поверхности, что позволяет исследовать тонкие эффекты влияния относительно малых трансформаций судовой поверхности на буксировочное сопротивление, при которых изменения водоизмещения составляют порядка десятых долей процента.
- На базе предложенной модели систематических трансформаций разработан метод снижения сопротивления движению судна, в основу которого **впервые** введено предположение о независимости влияния формы разных участков носовой части корпуса, выделенных по длине судна, на его буксировочное сопротивление. Метод обеспечивает надежную оценку влияния трансформаций судовой поверхности на буксировочное сопротивление и позволяет определять комбинацию трансформаций, соответствующую оптимальной форме носовой части по критерию минимального удельного сопротивления корпуса судна.

Основные научные результаты раздела опубликованы в [66, 73]; труды апробационного характера [47, 49, 50, 51].

РАЗДЕЛ 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ССП

Экспериментальное исследование выполнено в рамках Соглашения о научно-техническом сотрудничестве между НУ «ОМА» и ОНМУ, представленном в Приложении Е.

Целью экспериментального исследования является проверка адекватности и эффективности метода оптимальной трансформации носовой части судна.

Численное исследование тихоходного ССП большой полноты, представленное в подразделе 3.3, показало, что за счет трансформации носовой части на протяжении от 2% (бульбовая наделка) до 14% длины корпуса по ватерлинии можно снизить буксировочное сопротивление на 4–6%.

Проверка адекватности этих данных с помощью эксперимента, заключается, на наш взгляд, в надежном подтверждении качественного соответствия между трансформациями формы носовой части и величинами буксировочного сопротивления с учетом возможного влияния погрешности.

Габаритные размерения рассмотренного ССП соответствуют ограничениям по условиям эксплуатации через шлюзы Волго-Донского речного канала (ВДРК). Поэтому по характеристикам формы и скоростному режиму его можно отнести к весьма многочисленной группе судов разного назначения класса «Волго-Дон макс» [16]. Для судов класса «Волго-Дон макс» нового поколения характерны высокие значения коэффициента общей полноты около 0.9.

С учетом вышесказанного, вместо простой проверки всех результатов из подраздела 3.3, было признано более полезным расширить проверку эффективности разработанных решений на суда того же класса, размерения и исходные обводы которых несколько различаются.

Примененный метод оптимальной трансформации носовой части предназначен, главным образом, для детальной отработки формы корпуса с учетом ее исходных особенностей. Однако в случае исследованного ССП диапазон возможных вариаций формы носовой части был достаточно узким из-за большой полноты, малой длины носового заострения и других проектных ограничений. По существу, этот диапазон был полностью проработан. Поэтому

можно ожидать, что полученные результаты, прежде всего, форма строевой по шпангоутам – рис. 4.1, представляют собой общее, близкое к оптимальному решение для судов с соответствующими характеристиками формы и скоростными режимами.

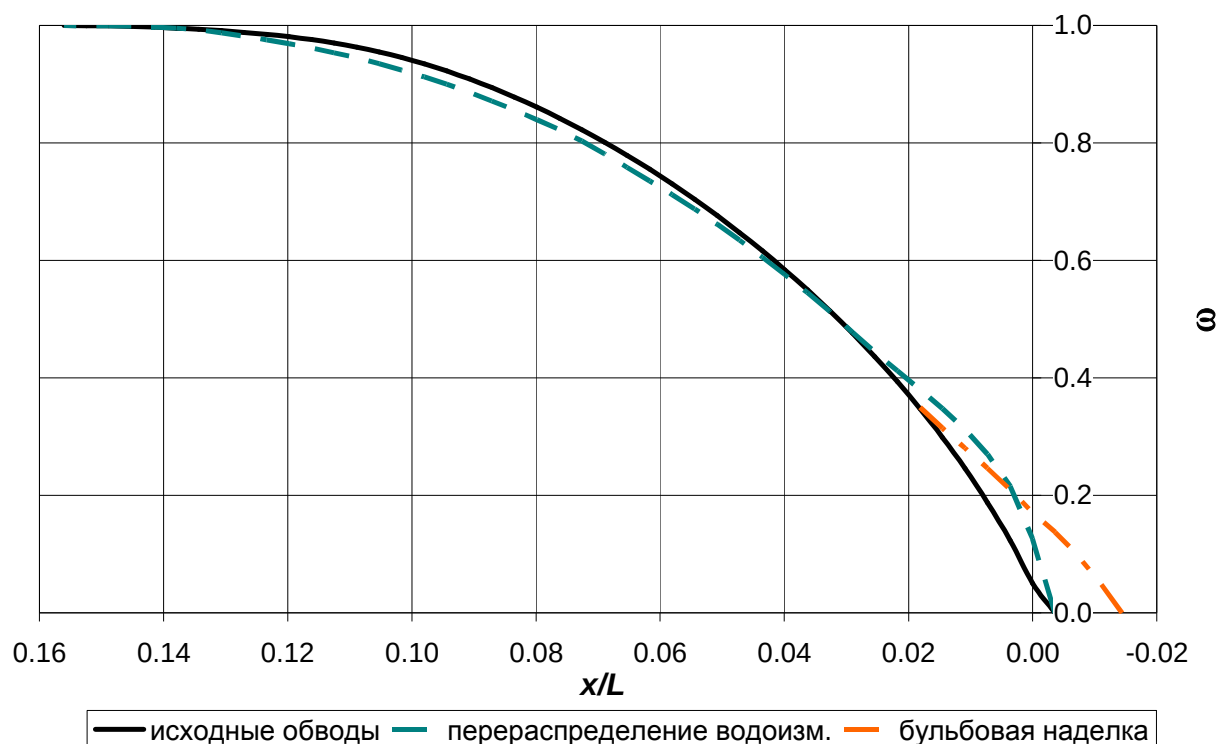


Рисунок 4.1 – Строевые по шпангоутам, соответствующие результатам подраздела 3.3

С целью сокращения трудоемкости и сроков экспериментальных исследований было принято решение об использовании имеющейся в опытовом бассейне ОНМУ модели судна класса «Волго-Дон макс». Было запланировано определение буксировочного сопротивления объекта с тремя вариантами обводов носовой оконечности – исходного и двух усовершенствованных, подготовленных в соответствии с результатами подраздела 3.3. Принятый план не позволял прямо сопоставить все экспериментальные и ранее полученные численные результаты, так как исходная форма корпуса имеющейся модели в носовой части, а также в общей для всех вариантов кормовой части несколько отличалась от формы корпуса исходного объекта из подраздела 3.3. Поэтому были выполнены

дополнительные численные расчеты, в которых форма корпуса объектов точно соответствовала экспериментальным моделям.

4.1. Объекты исследования

Объекты исследования подготовлены на основе корпуса полного тихоходного ССП, форма корпуса которого имеет некоторые отличия от объекта численного исследования из подраздела 3.3. Носовые обводы при близкой форме шпангоутов и ДП имеют другое распределение водоизмещения по длине. Транцевая кормовая оконечность санного типа приспособлена для установки двух полноповоротных винто-рулевых колонок, не имеет обтекателя, в ДП установлен скег. Теоретический чертеж исходного корпуса – объекта экспериментального исследования представлен в Приложении В на рис. В.9 и рис. В.10.

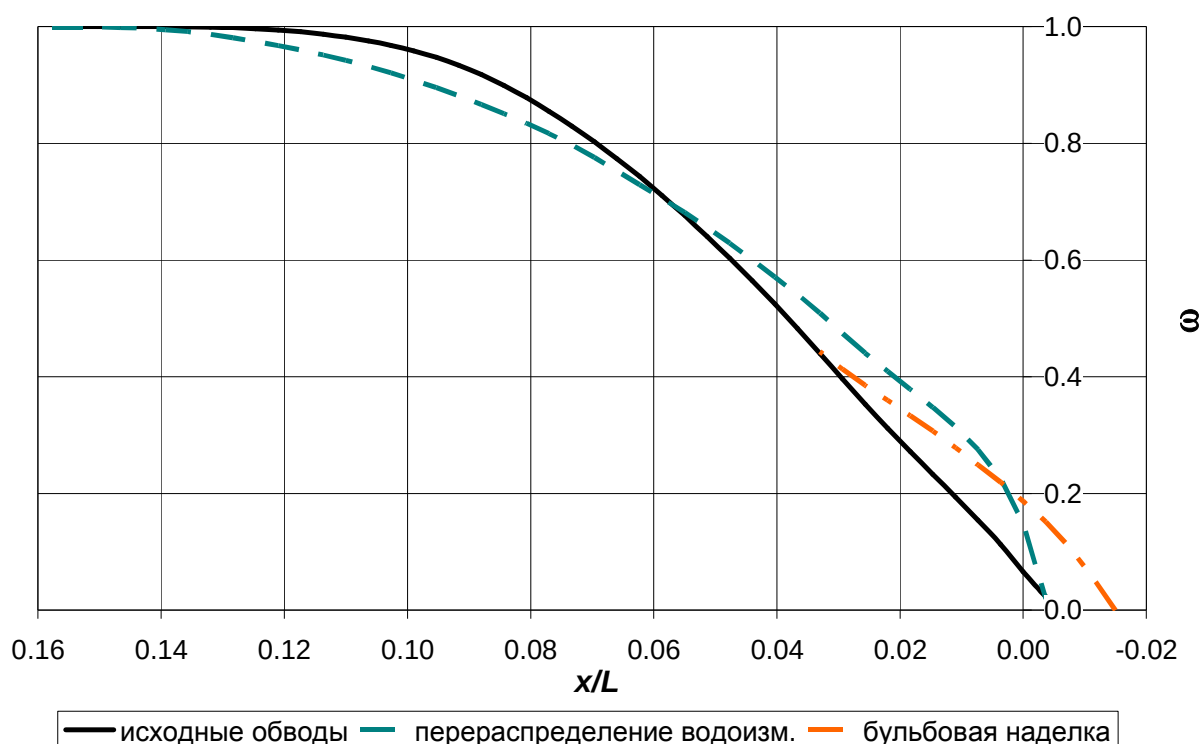


Рисунок 4.2 – Строевые по шпангоутам объектов эксперимента (носовая часть)

В качестве усовершенствованных обводов рассмотрены:

- 1) носовые обводы с перераспределением водоизмещения по длине, полученные в результате исследования подраздела 3.3 (замена всей носовой части у исходного объекта эксперимента), теоретический

чертеж – рис. В.5 и рис. В.6 в Приложении В;

- 2) исходные носовые обводы объекта эксперимента с добавлением бульбовой наделки, форма которой аналогична представленной в пункте 3.3.6 подраздела 3.3, теоретический чертеж – рис. В.11 и рис. В.12 в Приложении В.

В табл. 4.1 представлены основные геометрические элементы корпусов в модельном масштабе 1:50. Безразмерные строевые по шпангоутам исходных и усовершенствованных носовых частей показаны на рис. 4.2.

Таблица 4.1 – Геометрические характеристики объектов (масштаб 1:50)

Характеристики объектов		Исходные обводы из подраздела 3.3	Исходные обводы	Пере-распред. водоизм.	Бульбовая наделка
Модель №		-	1	2	3
Длина по КВЛ, L_{WL}	м	2.755	2.727		
Ширина, B	м	0.330	0.330		
Осадка по КВЛ, T	м	0.092	0.086		
Водоизмещение, V	м ³	0.0746	0.0689	0.0691	0.0692
Смоченная поверхность, S	м ²	1.3086	1.2734	1.2732	1.2814
Площадь сечения бульба на НП, A_{BT}	м ²	0.0015	0.0019	0.0042	0.0053
Абсцисса ЦВ, X_{CB}	м	0.034	0.029	0.032	0.034
Коэф-т общей полноты, C_B	-	0.892	0.891	0.892	0.894
Коэф-т полноты миделя, C_M	-	0.994	0.995		
Коэф-т полноты КВЛ, C_W	-	0.965	0.961	0.964	0.961
Коэф-т продольной полноты, C_P	-	0.897	0.895	0.897	0.899

4.2. Метод исследования

4.2.1. Экспериментальная установка и модели

Буксировочные испытания трех моделей (геометрические характеристики – табл. 4.1) выполнены летом 2014 г. в опытовом бассейне ОНМУ под руководством А.В. Демидюка.

Опытовый бассейн ОНМУ является бассейном гравитационного типа системы Веленкампа с размерами гидроканала 35.5×6.0×2.2 м, емкостью 400 м³. Гидроканал выполнен в виде железобетонной конструкции, днищевая часть

которой имеет параболическую форму. Описание бассейна и его технических особенностей можно найти в статье [39].

В бассейне ОНМУ движение модели происходит под действием силы веса груза, падающего в шахту глубиной 20 м, с помощью буксирующего механизма с передаточным числом 0.5. По достижении моделью постоянной скорости ее сопротивление определяется величиной буксирующего груза.

Таким образом, основной измерительной системой бассейна ОНМУ при проведении буксировочных испытаний является система измерения скорости движения модели. В настоящее время система измерения скорости прошла модернизацию [9], в ходе которой была установлена современная измерительная аппаратура и подготовлено соответствующее программное обеспечение (ПО).

Общая схема бассейна гравитационного типа представлена в Приложении Ж (рис. Ж.1), ниже на рис. 4.3 представлена схема системы измерения скорости модели бассейна ОНМУ. Аппаратная часть системы включает датчик скорости, преобразователь сигнала, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и ПЭВМ.

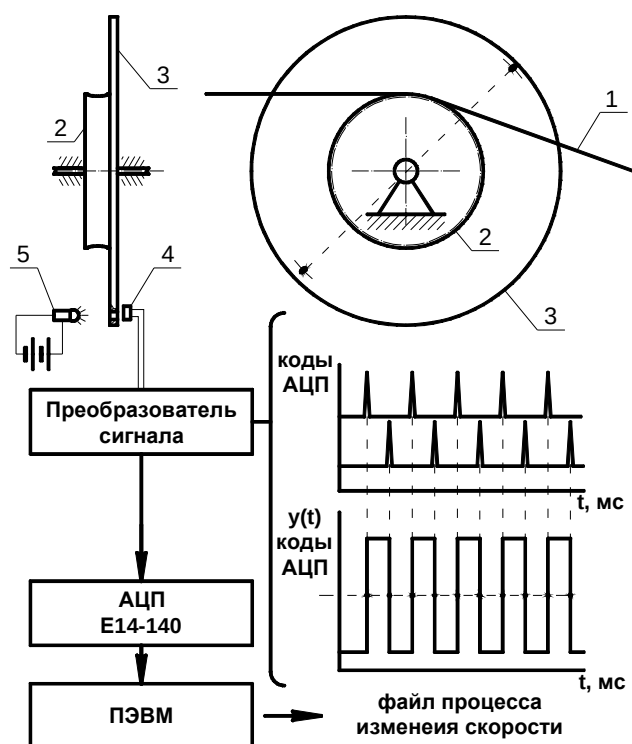


Рисунок 4.3 – Схема измерения скорости модели в бассейне ОНМУ

Принцип работы системы измерения скорости следующий (рис. 4.3). При пробеге модели трос буксировочной системы 1 приводит во вращение измерительный шкив 2 и скрепленный соосно с ним диск 3. В диске 3 выполнены два отверстия, расположенные на диаметральной хорде по разные стороны оси вращения. При прохождении одного из отверстий мимо фотодатчика 4, свет от осветителя 5 проходит через отверстие и падает на фотодатчик, вызывая в нем электрический импульс, который поступает в преобразователь сигнала. Набор импульсов от фотодатчика преобразуется в сигнал, который после обработки в АЦП записывается в виде двух массивов: кодов АЦП и соответствующих значений времени.

В программной части применяется отдельная процедура записи и обработки данных. Запись процесса изменения скорости выполняется штатным ПО АЦП. Данные сохраняются на носитель информации ПЭВМ для дальнейшей обработки. Обработка данных выполняется с помощью ПО Towspeed, разработанного А.В. Демидюком. В ходе обработки выполняется преобразование данных в массив значений скорости буксировки и соответствующих им значений времени, который подвергается анализу с целью определения границ мерного участка и осреднения на нем скорости.

Для достижения скорости, близкой к постоянной, в пределах мерного участка ограниченной длины в механизм буксировки включено разгонное устройство. Для плавной остановки модели применяется устройство торможения.

Модели были изготовлены из пенопласта и покрыты сплавом парафина с воском. Модельный масштаб 1:50 обеспечивает относительные размеры моделей и бассейна, исключая влияние стеснения потока. Для обеспечения турбулентного режима течения в ПС в носовой части устанавливались два проволочных турбулизатора диаметром 1.5 мм – в районах НП и первого теоретического шпангоута. Фотография носовой части модели 2 (с перераспределением водоизмещения) с установленными турбулизаторами представлено на рис. 4.4. Фотографии испытанных моделей дополнительно представлены в Приложении 3.



Рисунок 4.4 – Носовая часть модели с турбулизаторами (модель 2)

4.2.2. Методика модельных испытаний и пересчета их результатов

Использованная в исследовании методика проведения модельных испытаний является стандартной для опытовых бассейнов гравитационного типа, поэтому ниже приведены лишь некоторые сведения об оценке влияния разгонного груза на среднюю скорость модели, которая выполнялась в ходе испытаний. Протоколы модельных испытаний представлены в Приложении И.

Разгон до мерного участка осуществляется под действием веса разгонного груза, который необходимо подобрать так, чтобы после окончания разгона модель двигалась равномерно. Если груз выбран не вполне точно, движение модели после разгона будет слегка ускоренным или замедленным. Согласно методике ОНМУ, скорость модели считается постоянной, если ее отклонение на мерном участке не превышает 0.5% от среднего значения.

Хотя известны различные способы предварительной оценки величины разгонного груза в соответствии с весом модели и скоростью, которой необходимо достичь к концу разгона, наиболее надежным является определение скорости по результатам нескольких пробегов (как правило, трех) с одним буксирующим грузом и несколькими разгонными. Этот подход был применен и в настоящем исследовании. Пример данных для выбора пробега, который лучше всего соответствует равномерному движению модели, представлен на рис. 4.5.

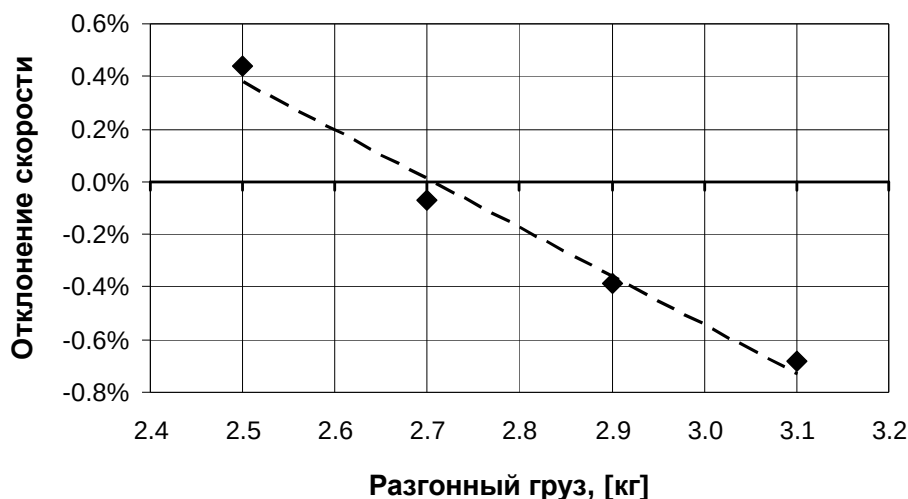


Рисунок 4.5 – Влияние разгонного груза на скорость модели на мерном участке

Результаты модельных испытаний были пересчитаны на натуру по стандартной методике, согласно которой коэффициент остаточного сопротивления натурного корпуса равен коэффициенту остаточного сопротивления модельного. Коэффициент остаточного сопротивления представляет собой разность коэффициентов полного сопротивления и сопротивления трения, вычисленного для эквивалентной технически гладкой пластины по формуле Прандтля-Шлихтинга:

$$C_T = \frac{R}{0.5\rho V^2 S} = C_R + C_{F0}, \quad (4.1)$$

$$C_{F0} = \frac{0.455}{(\lg Re)^{2.58}}. \quad (4.2)$$

В пересчете использовались зависимости $C_R(Fr)$, построенные в виде плавных кривых (сплайнов), аппроксимирующих результаты эксперимента. Плотность воды ρ определена для экспериментальных условий в зависимости от температуры (согласно [64, с. 10]), которая измерялась при проведении испытаний.

Ввиду сопоставительного характера исследования, надбавки на выступающие части, шероховатость обшивки, воздушное сопротивление судна в величину полного сопротивления не включались. Протоколы пересчета сопротивления моделей на натуру представлены в Приложении К.

4.2.3. Оценка погрешности измерений

Сопоставление величин буксировочного сопротивления моделей играет в настоящем исследовании важную роль, при этом относительная разница может быть небольшой, порядка 3–6%. Поэтому представляется полезным выполнить специальную оценку погрешности измерений, по результатам которой можно было бы судить о достоверности сопоставления.

В настоящее время наиболее авторитетными считаются методы оценки погрешности измерений при буксировочных испытаниях в опытовых бассейнах, предложенные Международной конференцией опытовых бассейнов (МКОБ или ITTC). Согласно рекомендациям МКОБ, погрешность измерений характеризует относительная неопределенность, которая представляет собой доверительный интервал с уровнем надежности 95%.

Общие принципы оценки неопределенности в экспериментальной гидродинамике изложены в Руководстве МКОБ № 7.5-02-01-01 [81]. Особенности анализа неопределенности результатов буксировочных модельных испытаний в опытовом бассейне изложены в Руководстве № 7.5-02-02 [82].

В соответствии с рекомендациями МКОБ, оценка общей неопределенности результатов испытаний выполняется с учетом всех возможных факторов, начиная с подготовки теоретических чертежей и изготовления моделей и заканчивая погрешностями измерительной аппаратуры и обработки данных. Очевидно, такая всесторонняя оценка представляет собой отдельное объемное исследование.

В рамках настоящей работы оценка неопределенности результатов модельных испытаний выполнена в более узком виде. В ней рассмотрена только часть общей неопределенности, которая влияет на результаты сопоставления сопротивления моделей. В этом случае большую часть факторов можно не учитывать. Например, все три модели изготавливались в одних и тех же условиях, на базе одной и той же модели. Поэтому можно считать, что неопределенность, обусловленная неточностями геометрии, для всех моделей одинакова. Аналогичным образом можно не включать в оценку погрешности вес

буксирующих грузов, так как при испытаниях всех моделей использовался один и тот же набор грузов.

Анализ источников возможных погрешностей показал, что на результаты сопоставления может оказать существенное влияние лишь случайная погрешность в измерении скорости буксировки. Другие условия для моделей можно считать идентичными.

Оценка неопределенности измерения скорости буксировки выполнена по методу А Руководства [81]. Метод А предполагает проведение серии экспериментов (желательно не менее десяти) в одних и тех же условиях с последующей обработкой результатов статистическими методами.

Серия экспериментов включала четырнадцать пробегов модели 2, выполненных в одинаковых условиях с буксирующим грузом 0.7 кг и разгонным грузом 2.2 кг. Комбинация грузов обеспечивала на мерном участке равномерное движение модели с $Fr = 0.188$. Результаты замеров скорости движения модели и расчет неопределенности представлены в табл. 4.2.

В таблице 4.2 $\bar{V}$ – средняя скорость по всем пробегам:

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i, \text{ где:} \quad (4.3)$$

n – число пробегов.

Дисперсия s^2 , квадрат среднего квадратичного отклонения (СКО) s , рассчитана по обычной формуле:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2. \quad (4.4)$$

Неопределенность u (граница доверительного интервала) в соответствии с рекомендацией [81] для случаев с числом опытов порядка десятков назначена с помощью закона распределения Стьюдента при уровне надежности 95%:

$$u = 2.25s. \quad (4.5)$$

Таблица 4.2 – Расчет неопределенности измерения скорости модели

№	V , м/с	$V - \bar{V}$, м/с	$(V - \bar{V})^2 \cdot 10^6$, (м/с) ²
1	0.9415	0.0007	0.5435
2	0.9434	0.0027	7.0342
3	0.9393	-0.0014	2.0644
4	0.9428	0.0020	4.0611
5	0.9415	0.0007	0.4847
6	0.9361	-0.0047	21.8723
7	0.9423	0.0015	2.3263
8	0.9422	0.0015	2.1557
9	0.9413	0.0006	0.3116
10	0.9395	-0.0013	1.5871
11	0.9402	-0.0005	0.2935
12	0.9417	0.0009	0.8468
13	0.9397	-0.0011	1.1509
14	0.9392	-0.0016	2.5115
$\bar{V}$, м/с	0.9408		
s^2 , (м/с) ²	$3.6341 \cdot 10^{-6}$		
s , м/с	0.0019		
u , м/с	0.0043		
$u / \bar{V} $, %	0.46%		

Относительная неопределенность (доверительный интервал) измерений скорости движения модели при скорости буксировки, близкой к расчетной, составил $\pm 0.46\%$. В соответствии с известным квадратичным характером зависимости буксировочного сопротивления от скорости, отраженным в Руководстве [82], относительная неопределенность по буксировочному сопротивлению составляет $\pm 0.92\%$.

4.3. Результаты исследования

Кривые коэффициента остаточного сопротивления моделей, полученные в результате обработки данных испытаний (Приложение К), представлены на рис. 4.6. Кривые буксировочного сопротивления в модельном масштабе и диаграмма величин сопротивления при $Fr = 0.183$ (13 узлов для натурного судна) показаны на рис. 4.7. На диаграмме для модели 2 (перераспределение водоизмещения) с помощью маркера показана неопределенность, оценка которой описана выше в

пункте 4.2.3. На рис. 4.8 показаны кривые буксировочного сопротивления и диаграмма величин сопротивления в натурном масштабе.

На рис. 4.9 представлена фотография буксировки модели 2 при относительной скорости, близкой к расчетной. Фотографии буксировки моделей также представлены в Приложении Л.

Согласно полученным результатам, буксировочное сопротивление у моделей 2 и 3 с усовершенствованными обводами ниже, чем у модели 1 с исходными обводами.

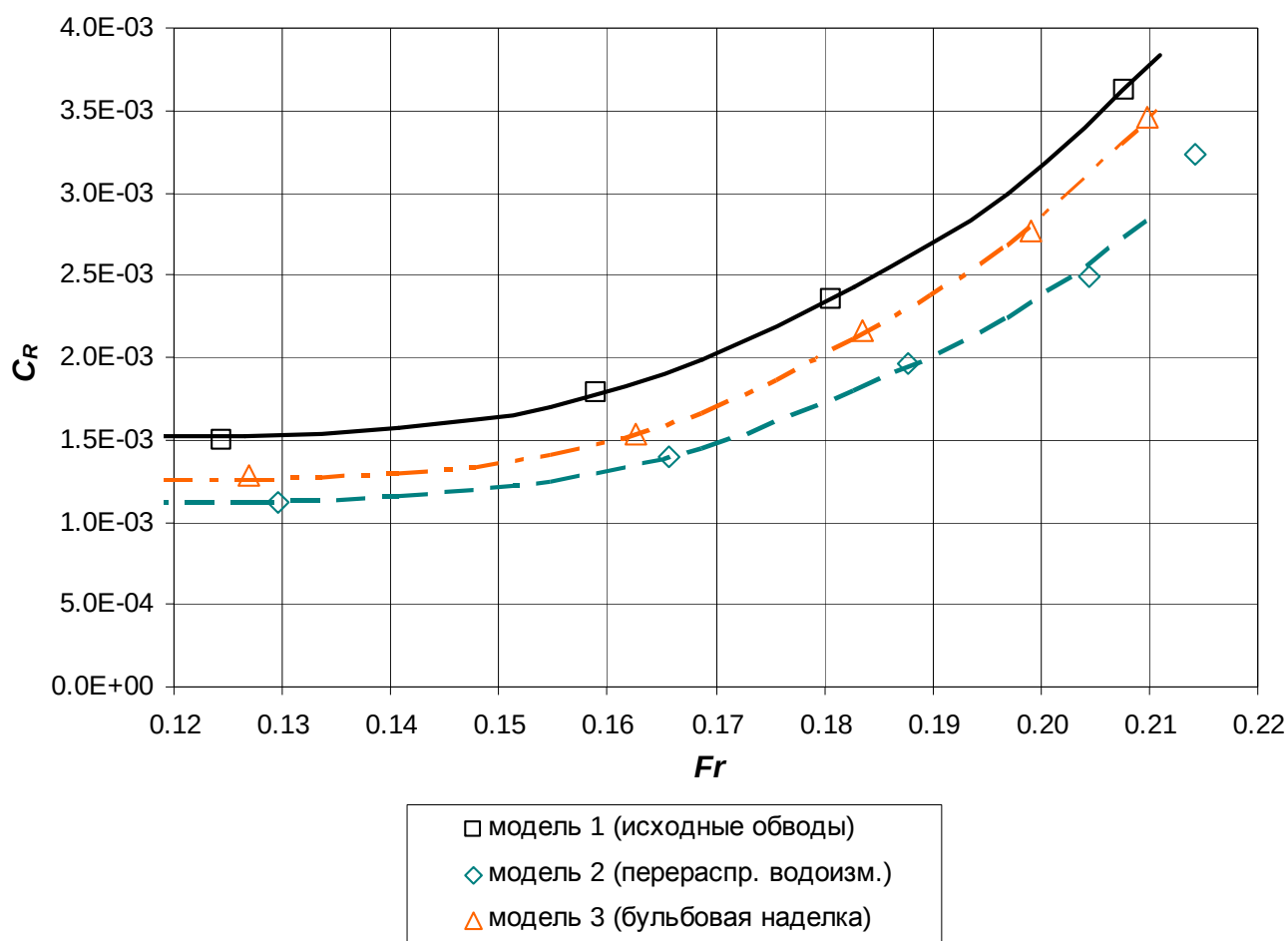


Рисунок 4.6 – Кривые коэффициента остаточного сопротивления

Снижение сопротивления корпуса с продольным перераспределением водоизмещения в носовой части (модель 2) при $Fr = 0.183$ (13 узлов для натуре) в модельном масштабе составило 10.1%, в натурном 15.6%. Сопротивление корпуса с бульбовой наделкой (модель 3) при $Fr = 0.183$ (13 узлов для натуре) меньше, чем у исходного, на 4.4% в модельном масштабе, на 7.1% в натурном.

Разница в сопротивлении между моделями значительно выше оценки неопределенности $\pm 0.9\%$, и результаты сравнения можно считать вполне надежными.

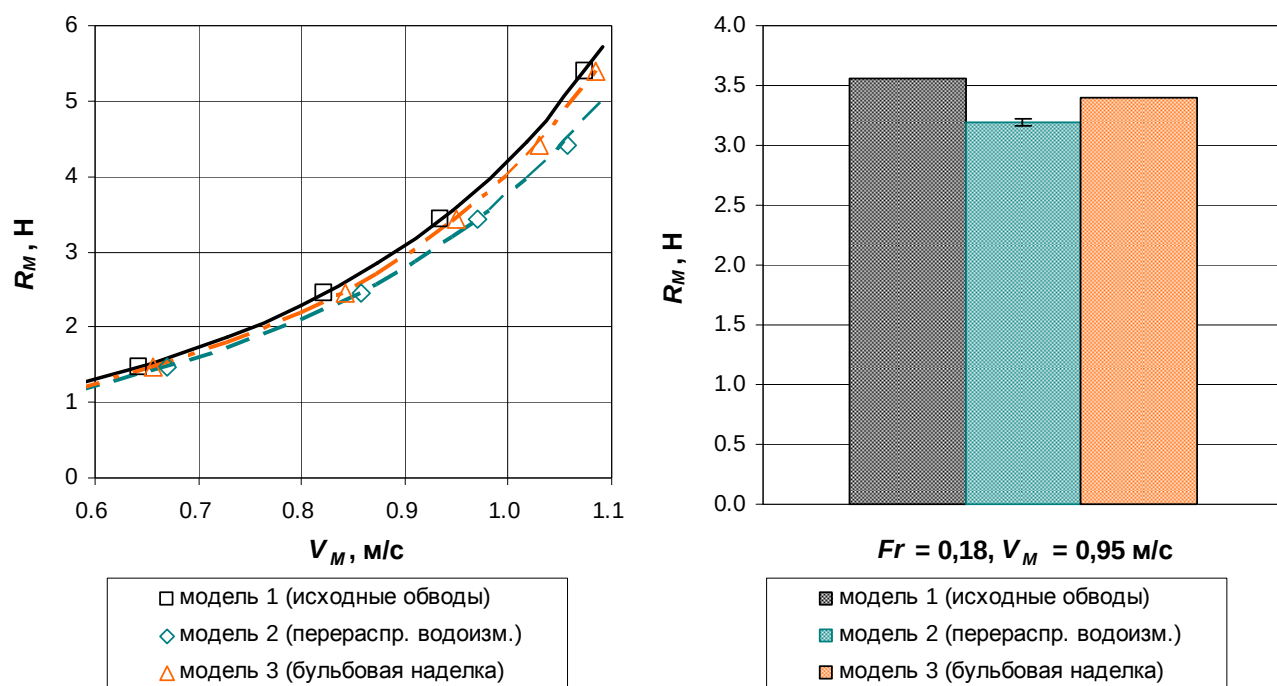


Рисунок 4.7 – Буксировочные характеристики в модельном масштабе

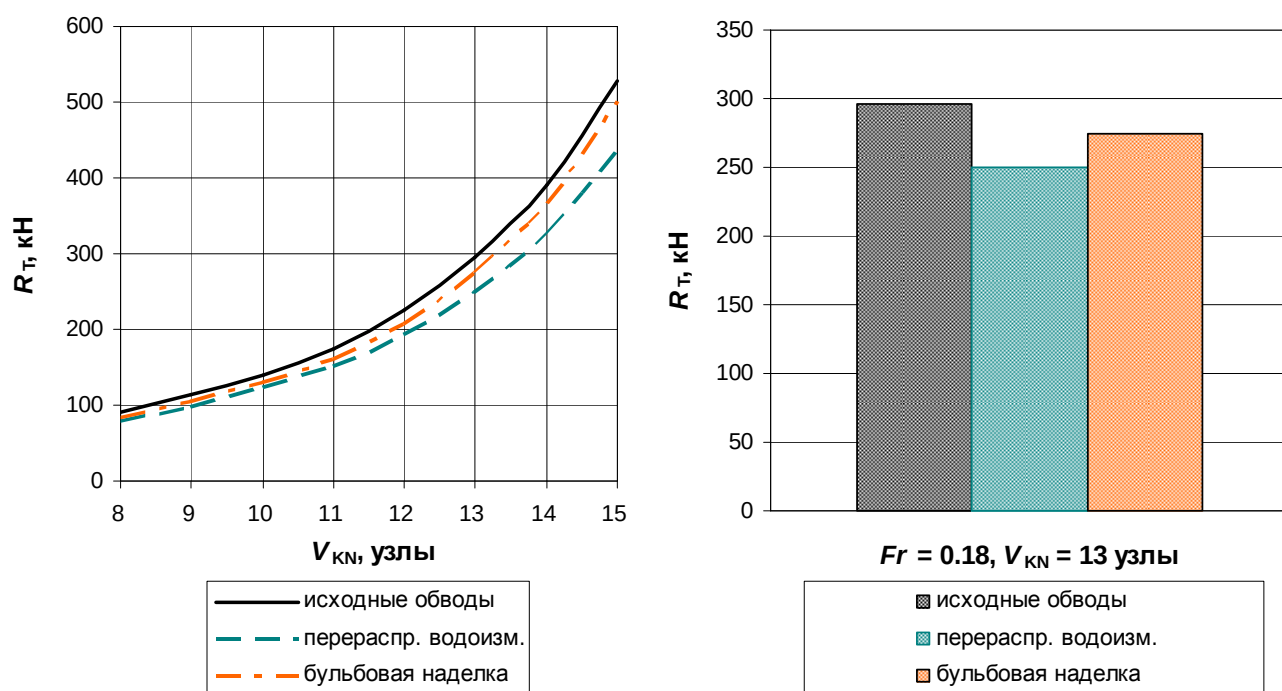


Рисунок 4.8 – Буксировочные характеристики в натурном масштабе



Рисунок 4.9 – Буксировка модели 2 (перераспр. водоизмещения) при $Fr = 0.188$

4.4. Анализ полученных результатов

4.4.1. Анализ на качественном уровне

Результаты экспериментального исследования содержат существенные качественные расхождения с численным исследованием из подраздела 3.3. Согласно экспериментальным результатам, самым низким сопротивлением на всем диапазоне скоростей обладает корпус с перераспределением водоизмещения в носовой части (модель 2). Корпус с бульбовой наделкой (модель 3) оказался менее выгодным. В численном исследовании была зафиксирована обратная ситуация. Выше оказалась и относительная разница в сопротивлении между вариантами обводов: в численном исследовании 4-6% полного сопротивления корпуса в масштабе натуре; в экспериментальном – 7-16%.

Как отмечено выше, исходные обводы (как носовые, так и кормовые) объектов численного и экспериментального исследования отличались, поэтому было выполнено дополнительное численное моделирование. В нем использовались геометрические модели корпусов, точно соответствующие объектам экспериментального исследования. Численное моделирование выполнялось в масштабе натуре по методике подраздела 2.2.

Результаты этих численных расчетов качественно лучше соответствуют экспериментальным данным, особенно при высоких скоростях буксировки. На рис. 4.10 показаны кривые полного сопротивления в натурном масштабе, полученные с помощью расчета и эксперимента. На рис. 4.11 показаны диаграммы величин сопротивления при $Fr = 0.183$ (13 узлов для натуры).

Из рис. 4.10 и рис. 4.11 видно, что по результатам численного моделирования обводы с перераспределением водоизмещения в носовой части обладают самым низким сопротивлением, как и по результатам эксперимента. Обводы с бульбовой наделкой дают выигрыш по сравнению с исходными обводами лишь при скорости более 12 узлов. При скорости 13 узлов сопротивление корпуса с бульбовой наделкой меньше, чем у исходного, на 3.3%, корпуса с продольным перераспределением водоизмещения – на 14.4%.

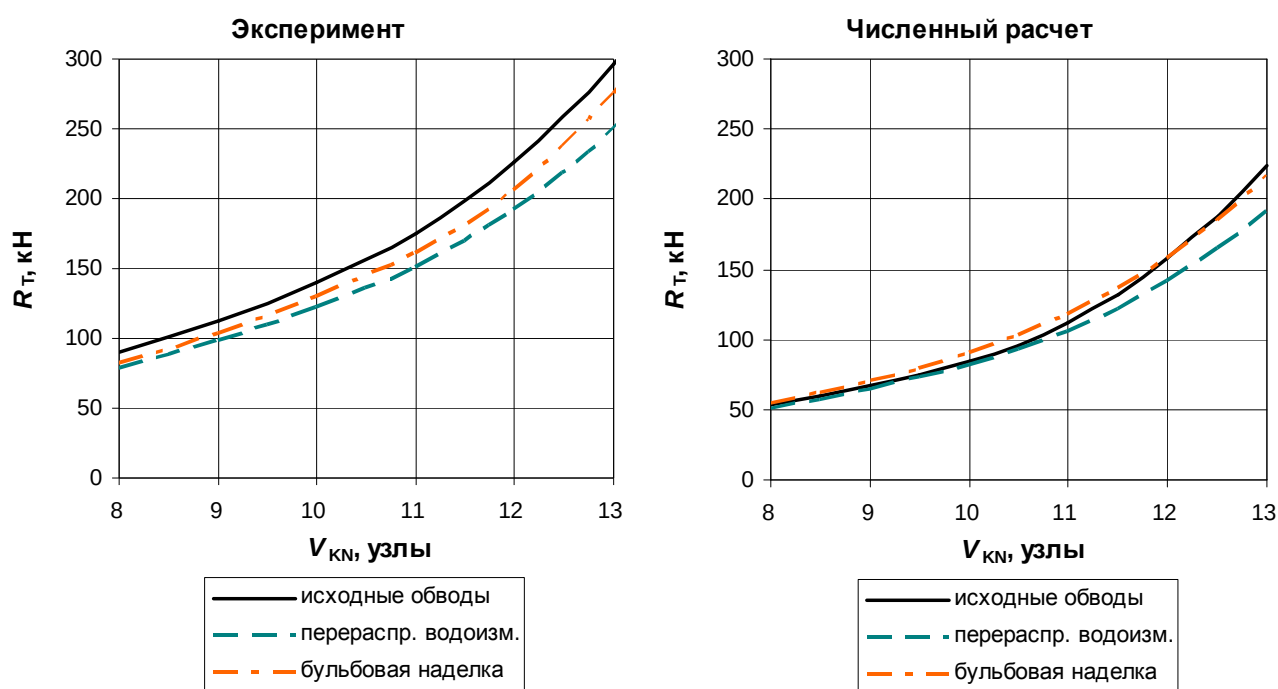


Рисунок 4.10 – Кривые полного сопротивления в натурном масштабе

Сравнение показало также, что численные и экспериментальные данные серьезно отличаются количественно. При $Fr = 0.183$ разница между величинами полного сопротивления корпуса с исходными обводами в натурном масштабе составляет 31.9%. Вопрос о причинах расхождений рассмотрен ниже в пункте

4.4.2. Здесь же отметим, что основные расхождения имеют место в вязкостной составляющей сопротивления.

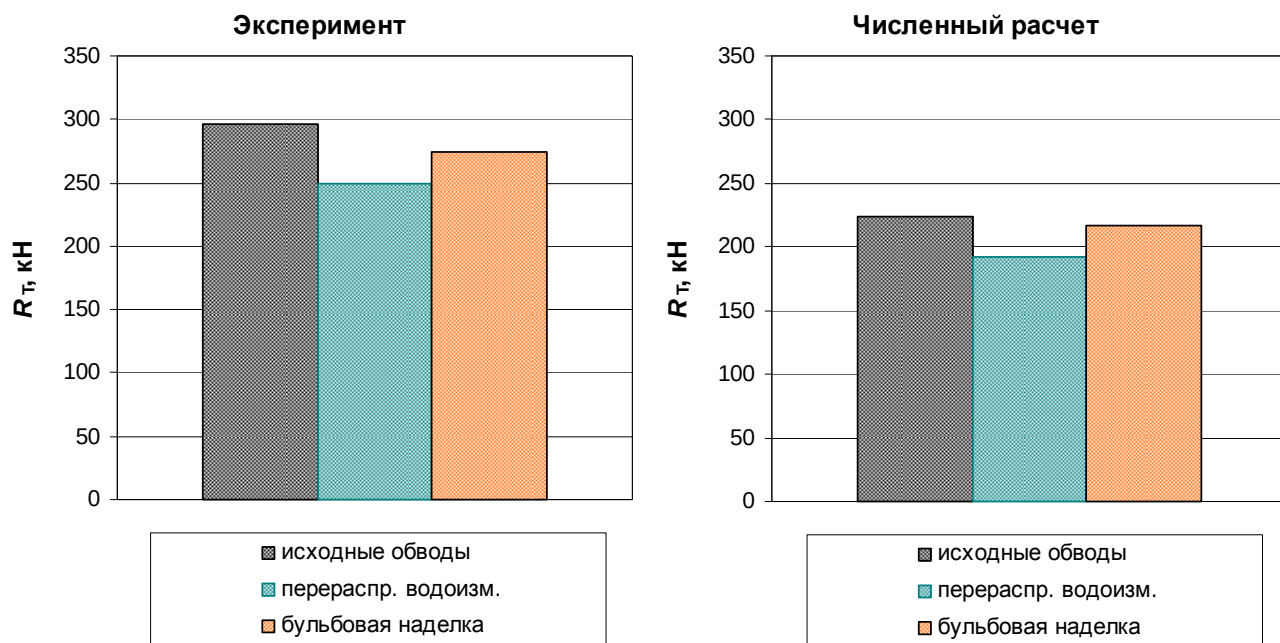


Рисунок 4.11 – Диаграммы полного сопротивления при $Fr = 0.183$ (13 узлов)

Этот вывод сделан на основе анализа составляющих полного сопротивления. После обычного при обработке эксперимента разделения сопротивления на сопротивление трения эквивалентной пластины R_{F0} и остаточное сопротивление R_R , последняя величина была разделена на волновое сопротивление R_W и сопротивление формы R_{PV} . Для модельного эксперимента разделение выполнено с помощью приближенной оценки коэффициента сопротивления формы как постоянного значения коэффициента остаточного сопротивления при малых Fr . Численное исследование было дополнено расчетами обтекания дублированной модели (с плоскостью симметрии на уровне ватерлинии). Остаточное сопротивление дублированной модели использовано при обработке результатов расчетов со свободной поверхностью в качестве сопротивления формы. Сравнение указанных компонентов представлено на рис. 4.12 и рис. 4.13.

Судя по рис. 4.12, доля расхождений в величине волнового сопротивления сравнительно невелика, причем волновое сопротивление по результатам эксперимента ниже, чем по данным численного моделирования. В то же время, из

рис. 4.13 видно, что сопротивление формы в эксперименте было выше, чем в численном моделировании, примерно в десять раз.

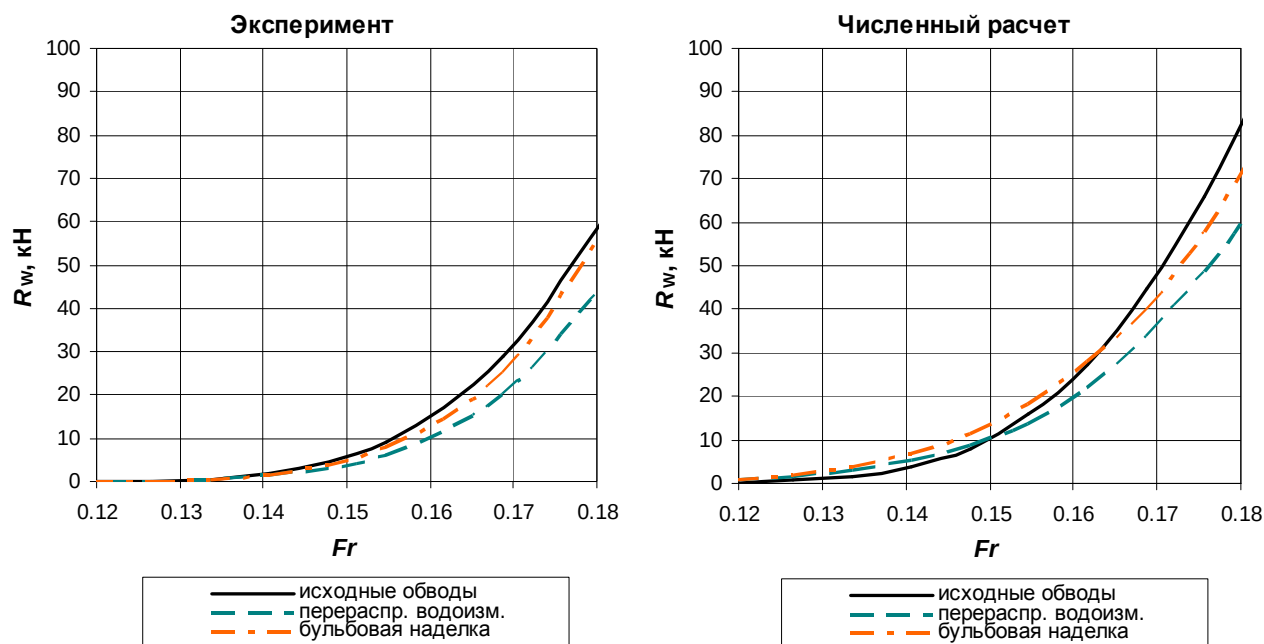


Рисунок 4.12 – Кривые волнового сопротивления

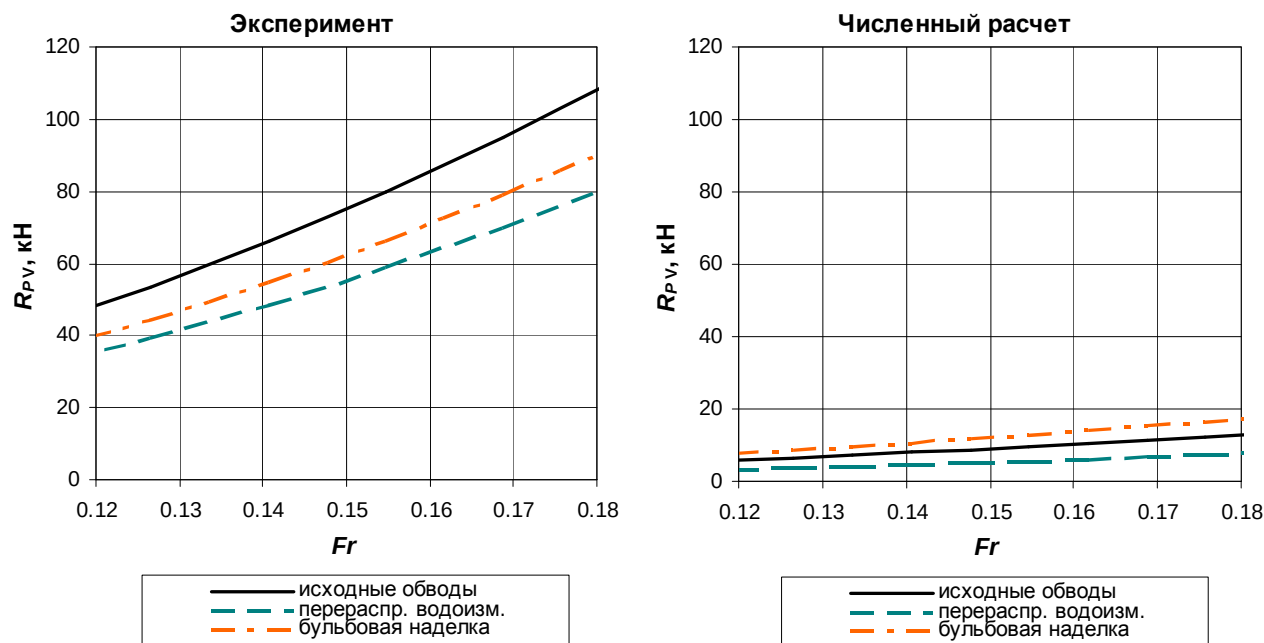


Рисунок 4.13 – Кривые сопротивления формы

По-видимому, первопричина расхождений связана именно с вязкостным сопротивлением формы. Большая разница в вязкостном сопротивлении могла отразиться на волновом сопротивлении из-за взаимодействия между волновыми и вязкостными явлениями в обтекающем корпус потоке. Характер такого

взаимодействия, как правило, приводит к снижению волнового сопротивления при росте вязкостного и наоборот, что наблюдается и в данном случае.

Метод, с помощью которого были разработаны усовершенствованные варианты носовой оконечности, нацелен на волновую составляющую, поэтому вязкостные явления, в общем-то, не лежат в фокусе настоящего исследования. В волновое сопротивление тихоходных судов основной вклад вносит носовая оконечность. Кроме того, принципы экспериментального моделирования надежнее всего позволяют прогнозировать волновое сопротивление. По этим причинам сопоставление численных и экспериментальных результатов по волновому сопротивлению представляется вполне корректным. Как видно из рис. 4.12, при таком сопоставлении результаты лучше всего соответствуют друг другу в качественном отношении.

Таким образом, сравнение вариантов носовых обводов по данным как экспериментального, так и численного моделирования позволяет сделать вывод о том, что в настоящем исследовании перераспределение водоизмещения оказалось значительно более выгодным, чем установка бульбовой наделки. Причиной противоречия между этим выводом и результатами исследования из подраздела 3.3 представляются разные контуры ДП и продольные распределения водоизмещения у исходных носовых обводов – рис. 4.14.

Нетрудно заметить, что исходная форма строевой по шпангоутам в экспериментальном исследовании была значительно дальше от формы строевой варианта с перераспределением водоизмещения, одинакового в обоих исследованиях, который рассматривается как оптимальный для судов данного типа. Этим можно объяснить большие относительные выигрыши в сопротивлении, полученные в экспериментальном исследовании.

Сравнивая рис. 4.1 и рис. 4.2, можно также заметить, что бульбовая наделка позволяет лишь частично перераспределить водоизмещение и приблизиться к оптимальной форме строевой. Как отмечено в пункте 3.3.6, установка наделки взамен может дать некоторый дополнительный выигрыш, связанный с увеличением выдвиг бульба. Очевидно, сравнительная выгодность наделки или

перераспределения водоизмещения существенно зависит от того, насколько исходные обводы были близки к оптимальным. Этим можно объяснить качественно разные результаты сопоставления вариантов носовых обводов в экспериментальном исследовании и численном исследовании из подраздела 3.3.

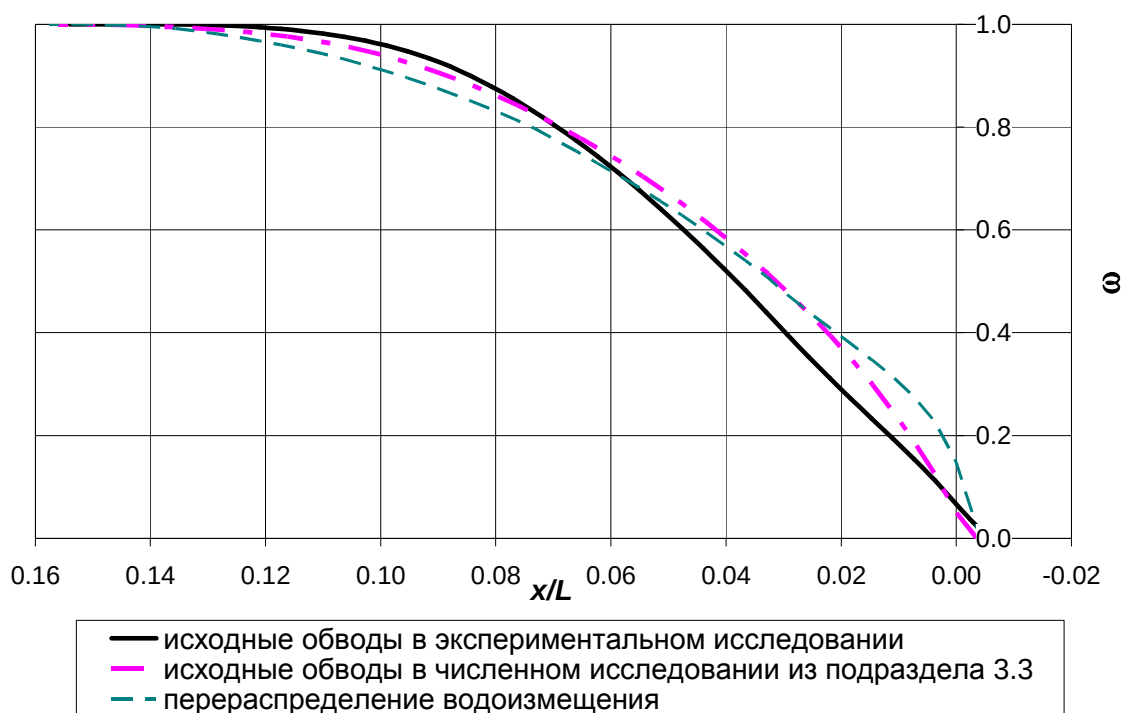


Рисунок 4.14 – Сопоставление строевых по шпангоутам

4.4.2. Анализ на количественном уровне

Большие расхождения в вязкостной составляющей сопротивления между данными численного и экспериментального моделирования, отмеченные в предыдущем пункте, нередко встречаются из-за сложных вязкостных явлений в потоке. В пункте 5.2.2 показано, как не вполне корректные подходы к численному моделированию при наличии развитого отрыва ПС в кормовой части модели могут приводить к большим погрешностям. Как правило, экспериментальные результаты при подобных расхождениях следует считать более надежными.

Однако в нашем случае, с одной стороны, численные результаты весьма хорошо совпали с экспериментальными в исследовании, описанном в пункте 2.3.2 (объект затем использован в исследовании из подраздела 3.3), с другой, – в исследовании, описанном в настоящем разделе, численные и экспериментальные результаты довольно плохо совпадают в количественном отношении. При этом

рассмотренные объекты очень близки по форме корпуса и скоростному режиму.

На рис. 4.15 представлены данные по удельному сопротивлению R/V этих объектов при скорости 13 узлов ($Fr \approx 0.18$). Данные по объекту из пункта 2.3.2 и подраздела 3.3 соответствуют численным результатам, которые практически совпадают с экспериментальными. По объекту настоящего исследования отдельно показаны данные численного и экспериментального моделирования.

Из рис. 4.15 видно, что удельное сопротивление объекта из пункта 2.3.2 и подраздела 3.3 примерно соответствует результатам, полученным численно по объекту настоящего исследования, что вполне объяснимо с учетом близких характеристик корпусов. Значительно более высокое удельное сопротивление, полученное в эксперименте, сложно объяснить объективными причинами.

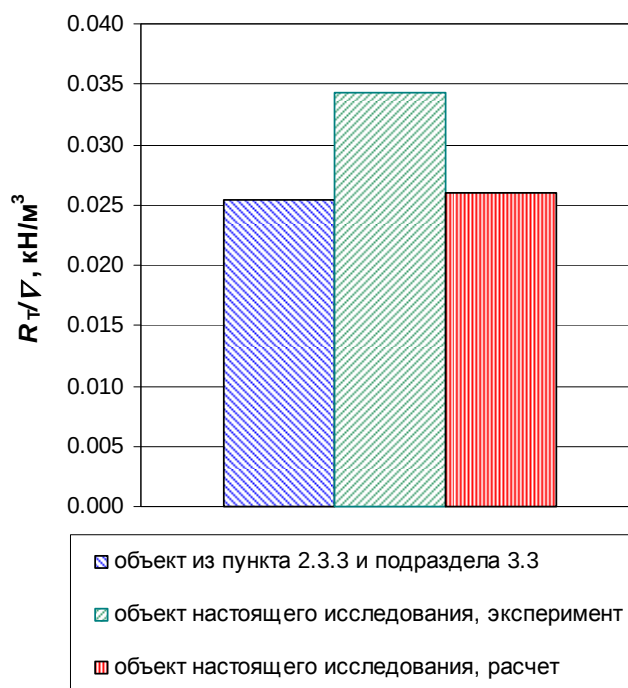


Рисунок 4.15 – Удельное сопротивление двух объектов

Сравнение обводов (рис. В.2 и рис. В.5 в Приложении В) не дает оснований предполагать, что объект эксперимента имеет более высокое сопротивление формы. Как правило, кормовая оконечность с обтекателем придает корпусу более высокое сопротивление формы, по сравнению с санными обводами без обтекателя. Эта тенденция присутствует в результатах численных расчетов.

В качестве возможного объяснения повышенного вязкостного

сопротивления в эксперименте было рассмотрено наличие мощного отрывного течения, которого не было у объекта численных расчетов. Исходя из обводов кормовой оконечности объектов и особенностей их обтекания, такая ситуация маловероятна. Однако здесь могли сыграть свою роль не только объективные факторы, связанные с гидродинамикой обтекающего корпус потока, но и субъективные, связанные с особенностями модельного эксперимента.

Экспериментальные данные по объекту численных исследований, представленных в пункте 2.3.2 и подразделе 3.3, были получены с помощью модели, изготовленной в масштабе 1:18.7 и испытанной в большом опытовом бассейне КГНЦ. Модель же экспериментального исследования настоящего раздела в соответствии с размерами опытового бассейна ОНМУ была изготовлена в масштабе 1:50. При испытаниях моделей в таких малых масштабах существует вероятность возникновения отрывных течений, не свойственных натурным объектам, по причине недостаточности или неустойчивости искусственной турбулизации ПС. В подобных случаях сопротивление модели может оказаться завышенным, несмотря на более низкое сопротивление трения в ПС, из-за мощных отрывных течений в кормовой части.

Для проверки этого сценария было выполнено дополнительное численное моделирование дублированной модели объекта эксперимента по методу, описанному в пункте 5.2.2. Результаты не выявили отрывов ПС в кормовой части, которые могли бы привести к значительному росту сопротивления. С помощью низкорейнольдсовых моделей турбулентности были также получены результаты, показывающие, что сопротивление не возросло бы и при полном отсутствии турбулизаторов в эксперименте. Несмотря на появление локальных отрывов в кормовой части, сопротивление корпуса во всех случаях было ниже, чем при полностью турбулентном режиме ПС.

Наконец, были проанализированы все особенности техники проведения эксперимента. Как отмечено выше в подразделе 4.3, все основные процедуры модельного эксперимента соответствовали стандартным методикам.

Определенные сомнения вызвала лишь установка сравнительно крупных стабилизаторов из проволоки диаметром 1.5 мм.

При испытании крупных моделей, например, в большом бассейне КГНЦ, обычно устанавливают проволочные турбулизаторы диаметром 1.0 – 1.5 мм. Их дополнительное или «паразитное» сопротивление, как правило, не учитывают в предположении, что собственное сопротивление турбулизаторов примерно компенсируется снижением трения на участках модели перед турбулизаторами из-за существования там ламинарного режима ПС.

С учетом разницы масштабов, диаметр турбулизаторов 1.5 мм на модели в масштабе 1:50 эквивалентен диаметру около 4.0 мм при масштабе 1:18.7. Очевидно, такая большая разница в размерах турбулизаторов может оказать влияние на сопротивление моделей. Оценка дополнительного сопротивления турбулизаторов приведена в Приложении М.

Оценка показала, что слишком высокое сопротивление турбулизаторов является весьма вероятной причиной количественных расхождений между результатами экспериментального и численного моделирования. Для получения более надежных результатов по объектам рассмотренного типа при небольших размерах моделей желательна проработка специальных схем искусственной турбулизации, обладающих низким собственным сопротивлением. К сожалению, простая корректировка результатов после испытаний путем учета сопротивления турбулизаторов не вполне эффективна, так как приводит к занижению волнового сопротивления. Все же количественные расхождения в данном случае не помешали выполнению целей экспериментального исследования, так как их влияние на относительную эффективность рассмотренных обводов мало.

4.5. Выводы по разделу 4

Результаты экспериментального исследования полностью подтвердили адекватность метода оптимальной трансформации носовой части. Было получено снижение буксировочного сопротивления моделей с носовыми частями, форма которых оптимизирована с помощью метода, на величины, исключющие

возможность заметного влияния погрешности эксперимента. Погрешность эксперимента была получена с помощью специальной оценки.

Получены данные, подтверждающие основную роль продольного перераспределения водоизмещения в снижении буксировочного сопротивления, соответствующие теоретической базе метода. Показано, что полезный эффект может в той или иной степени обеспечиваться за счет установки бульбовой наделки на исходные обводы. Сравнительная эффективность этой меры существенно зависит от того, насколько исходное продольное распределение полноты отличается от оптимального.

Научная новизна результатов раздела состоит в следующем. Получило дальнейшее развитие исследование проблемы влияния формы судового корпуса на его буксировочное сопротивление на основе анализа результатов применения метода к двум разным по характеру обводов и скоростному режиму судам, которые были подтверждены для одного из них специальным экспериментальным исследованием в опытовом бассейне. Согласно данным выполненных исследований, продольное перераспределение водоизмещения в носовой части судов является главным фактором в снижении их буксировочного сопротивления.

Основные научные результаты раздела опубликованы в [6]; также опубликован труд апробационного характера [7].

РАЗДЕЛ 5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

5.1. Достоверность результатов

Достоверность результатов работы обеспечена корректностью постановки задачи исследования, а также использованных теоретических и экспериментальных методов ее решения.

Постановка задачи выполнена в методологической взаимосвязи с теоретическими методами совершенствования судовых обводов, которые ранее уже дали важные научные результаты. Благодаря этому удалось выявить ряд известных теоретических закономерностей, подтверждающих достоверность полученных результатов на качественном уровне, в том числе:

- результаты совершенствования носовых обводов ССП соответствуют теоретическому критерию из исследований В.Г Сизова [60, 61] (см. с. 32 и с. 112);
- анализ волнообразования показал, что снижение сопротивления усовершенствованных обводов сопровождается ослаблением поперечных волн и усилением расходящихся, что отвечает базовым физическим закономерностям, зафиксированным известной формулой Т. Хавелока (1.2);
- декомпозиция буксировочного сопротивления, выполненная с помощью расчетов дублированных моделей, показала, что при строгих ограничениях задачи (постоянство водоизмещения и формы проекции на ДП) влияние трансформаций корпуса на волновое сопротивление и сопротивление формы носит взаимно противоречивый характер.

Обоснованием достоверности служит также непротиворечивость основных и вспомогательных результатов, логическая взаимосвязь между известными и вновь полученными данными. Эти вопросы рассмотрены в последующих подразделах, где изложены основные научные результаты работы.

Большое значение для достоверности результатов имеет адекватность и точность методов ВГД, которые использовались для определения буксировочного

сопротивления. Всестороннее исследование условий применения этих методов в указанной задаче, оформленное в работе в виде методики численного моделирования обтекания корпуса судна (подраздел 2.2), показало, что адекватность качественных результатов и точность количественных находятся на современном мировом уровне.

Это подтверждено результатами специального исследования эталонных судов (подраздел 2.3), согласно которому относительная погрешность по сравнению с надежными результатами экспериментов составила для полного тихоходного ССП -0.2% , для судна KCS умеренной полноты и быстроходности $+0.7\%$ для модели, закрепленной в начальном положении, и $+4.3\%$ для модели со свободной посадкой ($+1.4\%$ при $Fr > 0.26$).

Достигнутый в работе передовой уровень точности численного моделирования стал одной из предпосылок получения результатов, обладающих новизной. Точность обеспечена применением относительно подробных расчетных сеток с числом расчетных ячеек 1 – 4 млн., которые пока еще редко используются в расчетах рассмотренного типа. Выполнение при подготовке работы достаточно большого объема расчетов с такими параметрами сеток стало возможным за счет параллельных вычислений на суперкомпьютерах.

Для повышения достоверности результатов численного моделирования с учетом специфики исследования были приняты и дополнительные меры. В качестве исходных объектов, для которых выполнено совершенствование носовых обводов, были использованы эталонные суда, поэтому численные результаты по ним сохраняли опору на надежные экспериментальные данные.

При совершенствовании носовых обводов полного тихоходного ССП выигрыш в буксировочном сопротивлении составил 4.1% (за счет перераспределения водоизмещения в носовой части) и 5.6% (за счет установки бульбовой наделки). При совершенствовании носовых обводов судна KCS умеренной полноты и быстроходности выигрыш в буксировочном сопротивлении составил 8.9% (в постановке, соответствующей модели, закрепленной в начальном положении). Сопоставление этих величин с приведенными выше

величинами погрешностей показывает, что уровень точности был вполне достаточным для получения достоверных результатов.

В работу также включены данные, позволяющие распространить обоснование достоверности результатов численных расчетов по представленной методике на перспективные задачи совершенствования обводов других объектов в аналогичной или расширенной постановке (например, дополненной исследованием кормовых обводов). В подразделе 2.4 приведены сведения об успешном применении методов ВГД, аналогичных использованным в работе, к 47 объектам различного типа. Ниже изложены результаты исследования проблемы масштабного эффекта в численном моделировании обтекания корпуса судна, который, как правило, связан с кормовой оконечностью.

Достоверность результатов совершенствования носовых обводов полного тихоходного ССП подтверждена и удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных, полученных с помощью специального экспериментального исследования в рамках работы (раздел 4). При расчетной скорости выигрыш в буксировочном сопротивлении корпуса с усовершенствованными обводами составил по данным численного моделирования 14.4%, по данным экспериментального 15.6%. Имевшие место расхождения на качественном и количественном уровнях были соответствующим образом проанализированы и объяснены, в результате чего показано, что они не оказали существенного влияния на результаты работы.

Для оценки погрешности измерений при проведении эксперимента с учетом особенностей экспериментальной установки и поставленных в исследовании задач, на основе подхода, рекомендованного МКОБ, была получена относительная неопределенность измерения скорости буксировки модели, которая составила при скорости, близкой к расчетной, $\pm 0.5\%$. При сравнении величин буксировочного сопротивления это соответствует неопределенности $\pm 0.9\%$. Анализ показал, что погрешности измерений не оказали существенного влияния на результаты экспериментального исследования и работы в целом.

5.2. Методика численного моделирования обтекания корпуса судна

Разработанная методика численного моделирования обтекания корпуса судна имеет самостоятельное практическое значение, поскольку ее использование в значительной степени обеспечивает корректный подход к моделированию обтекания корпусов различного типа в широком диапазоне скоростных режимов. Методика рассмотрена как составной элемент предлагаемого решения задачи оптимизации формы носовой части корпуса, но она может использоваться также для определения сопротивления судов и отработки обводов обычными способами.

Однако для возможности полноценного применения методики ее необходимо дополнить данными об исследовании масштабного эффекта в численном моделировании, который проявляется в виде тех или иных несоответствий между результатами, полученными в разных масштабах. Очевидно, если такие несоответствия имеют место, они могут сказаться и на сравнении расчетных результатов, полученных в натурном масштабе, и экспериментальных результатов, полученных в модельном масштабе.

В предшествующих разделах проблема масштабного эффекта не рассматривалась, так как ее проявления в основном связаны с обтеканием кормовой части, и лежат несколько в стороне от задачи совершенствования формы носовой части судна. Как видно из результатов по эталонному ССП (см. пункт 2.3.2) и материалов Приложения Д, во многих случаях проблема масштабного эффекта не проявляется, и численное моделирование вполне успешно можно выполнять в натурном масштабе, избегая дополнительных процедур пересчета. Однако в некоторых случаях влияние масштабного эффекта на буксировочное сопротивление достаточно велико.

Проблема масштабного эффекта в эксперименте обусловлена тем, что при испытании моделей в опытовых бассейнах и гидрлотках строго соблюдается только критерий Fr . Если проследить влияние критерия Re на физические процессы, протекающие при буксировке модели, можно очертить основные проявления масштабного эффекта. По современным представлениям, остаточное сопротивление, моделируемое по критерию Fr , имеет сложную структуру [98, с.

186] и включает не только силы, обусловленные гравитационными свойствами жидкости (волновое сопротивление), но и силы вязкостной природы.

К силам, включенным в остаточное сопротивление, помимо волнового сопротивления, относятся: сопротивление давлений из-за вихреобразования и обратного влияния ПС (сопротивление формы), а также разница между сопротивлением трения трехмерного корпуса судна и эквивалентной пластины вследствие влияния кривизны поверхности (форм-фактор трения). Кроме того, между вязкостным и волновым сопротивлением имеет место взаимодействие, игнорируемое принципом их суперпозиции, выдвинутым Фрудом.

Моделирование остаточного сопротивления по критерию Fr приводит к тому, что часть его, обусловленная вязкостью жидкости и обобщенно называемая сопротивлением формы, предполагается автомодельной по числу Re и пересчитывается по кубу масштаба, что принципиально неверно.

Наблюдаемая в большинстве случаев автомодельность объясняется, по-видимому, слишком малыми изменениями коэффициента сопротивления формы в зависимости от числа Re , которое при переходе от модели к натуре меняется в относительно небольшом диапазоне (до нескольких порядков). Корпус судна, близкий к хорошо обтекаемому телу, имеет в таком диапазоне практически одинаковые значения коэффициента сопротивления формы.

При наличии автомодельности по сопротивлению формы масштабный эффект проявляется, главным образом, в несоответствии компонента трения в величине сопротивления и относительной толщины ПС между моделью и натурой. Несоответствие сил трения устраняется с помощью процедуры пересчета с учетом разницы в Re . Несоответствие толщин ПС из-за взаимодействия между вязкостными и волновыми явлениями имеет сложные последствия. По-видимому, корреляционные надбавки, применяемые при пересчете результатов на натуру, можно ассоциировать с этим эффектом.

При испытании модели роль вязкостных явлений преувеличивается, поэтому можно ожидать ослабления волнообразования. Тогда при пересчете на

натуру сопротивление судна будет недооценено, и необходимо вводить положительные корреляционные надбавки.

Ситуация может измениться при наличии значительного отрывного течения в кормовой части судна, характер которого, как и обусловленное им сопротивление, могут более интенсивно меняться в зависимости от Re . По современным представлениям зона отрывного течения с ростом Re уменьшается [8], поэтому сопротивление, пересчитанное с модели на натуру, будет иметь некоторую погрешность, направленную в безопасную сторону. Разработка корректных методов прогнозирования буксировочного сопротивления и других характеристик ходкости в условиях отрывного обтекания является одним из основных направлений дальнейшего совершенствования процедур пересчета.

Численное моделирование позволяет с новой стороны взглянуть на вопросы, связанные с масштабным эффектом, и в перспективе отказаться от процедур пересчета. Однако проблема нуждается в тщательном исследовании. Далее представлены некоторые результаты изучения автором масштабного эффекта с помощью численных методов.

5.2.1. Масштабный эффект в условиях безотрывного обтекания

Исследование эталонного судна KCS, представленное в пункте 2.3.1, было дополнено расчетами в натурном масштабе при $Fr > 0.26$. Для оценки результатов был выполнен пересчет экспериментальных данных на натуру по стандартной методике. Полученное сопоставление представлено в табл. 5.1.

Как видно из табл. 5.1, расхождения между расчетными и экспериментальными значениями коэффициента полного сопротивления C_T в натурном масштабе оказались выше, чем в модельном (табл. 2.3). Для всех Fr имеет место завышение расчетных данных по отношению к эксперименту на дополнительные 3-4%.

Анализ особенностей потока показал, что картина течения непосредственно за кормой в разных масштабах существенно различается – рис. 5.1 и рис. 5.2. Сложные процессы замыкания кормового транца приводят к разным результатам

формирования кормовой волновой системы. Более мощная кормовая волна в масштабе природы является причиной повышенного сопротивления.

Таблица 5.1 – Сопротивление судна KCS со свободной посадкой

Число Фруда	Эксперимент KRISO (пересчет на натуру)		Расчет FlowVision (масштаб натуре)		Расхождение в C_T , %
Fr	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	E
0.2599	0.8320	2.2094	0.9711	2.3485	+6.3%
0.2707	1.1460	2.5168	1.3321	2.7029	+7.4%
0.2816	1.6600	3.0245	1.7863	3.1509	+4.2%

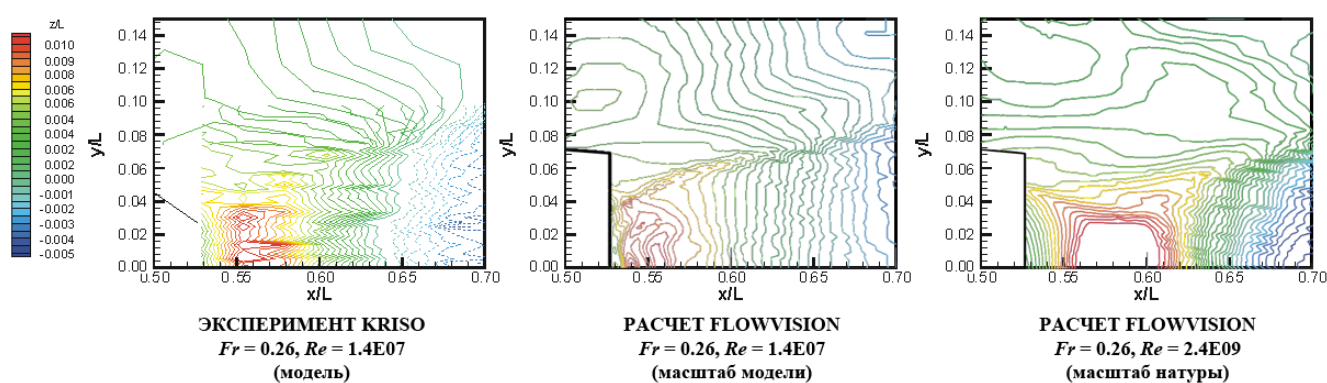


Рисунок 5.1 – Изолинии уровня свободной поверхности за кормой KCS

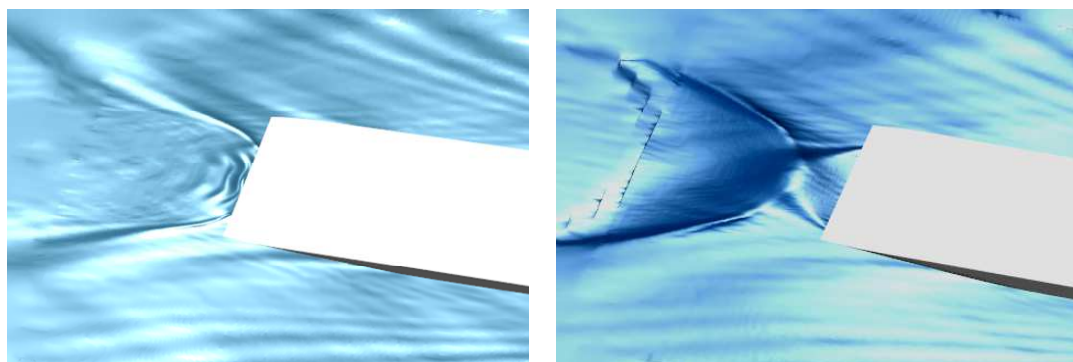


Рисунок 5.2 – Визуализация свободной поверхности за кормой KCS: слева для модельного масштаба, справа для натурального

Таким образом, результаты численного моделирования определенно указали на проявление масштабного эффекта, связанного с разницей в числах Re . Несмотря на безотрывное обтекание, масштабный эффект оказывает значительное влияние на величину буксировочного сопротивления. Этот вывод был несколько неожиданным, так как модель KCS имеет обводы, хорошо отвечающие

принципам модельного эксперимента и пересчета его результатов, что, очевидно, учитывалось и при выборе ее объектом эталонного тестирования.

5.2.2. Масштабный эффект в условиях отрыва ПС

Наличие развитого отрыва ПС при обтекании судового корпуса в общем случае является нежелательным, так как приводит к росту сопротивления и, в некоторых случаях, ухудшает условия работы движителей за корпусом. Однако для некоторых типов судовых обводов наличие отрыва ПС в кормовой части является неизбежным.

Наиболее распространенными обводами такого типа являются обводы морских судов с так называемой традиционной или нормальной кормовой оконечностью, то есть транцевой кормой с развитым центральным обтекателем под одновальный движительно-рулевой комплекс. Обводы современного морского сухогрузного судна (МСС) с одновальной кормой представлены в Приложении В на рис. В.13 и рис. В.14, главные размерения – в табл. 5.2.

Таблица 5.2 – Главные размерения МСС

Характеристики объекта	Натура	Модель (М1:17)
Длина по ватерлинии L_{WL} , м	87.3	5.138
Ширина B , м	14.5	0.853
Высота борта D , м	7.2	0.424
Осадка T , м	6.4	0.376
Водоизмещение объёмное ∇ , м ³	6827.2	1.389
Площадь смоченной поверхности S , м ²	2167.4	7.481
Коэффициент общей полноты C_B	0.842	
Относительная абсцисса ЦВ L_{CB} (%), в нос «+»	+0.82	

Буксировочные испытания модели МСС были выполнены в большом опытовом бассейне КГНЦ [38]. Визуализация обтекания кормовой оконечности показала наличие значительной зоны отрыва ПС – рис. 5.3.

Численное моделирование, выполненное для МСС в натурном масштабе по методике, описанной в подразделе 2.2, дало заниженные результаты по буксировочному сопротивлению. Из сравнения расчетных коэффициентов остаточного сопротивления дублированной модели с экспериментальными значениями при низких Fr видно (рис. 5.4), что занижение имело место в вязкостной составляющей. Анализ особенностей потока показал, что при численном моделировании отрыва ПС в кормовой части не происходит.



Рисунок 5.3 – Отрыв ПС при буксировке модели МСС

Источник: [38]

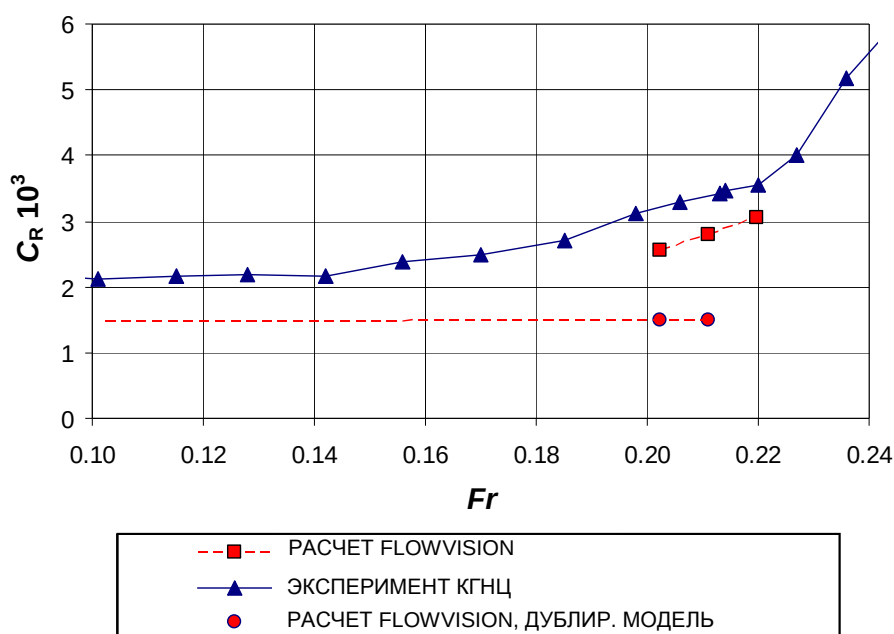


Рисунок 5.4 – Кривые коэффициентов остаточного сопротивления МСС

Для численного моделирования такого сложного явления как отрыв ПС с нефиксированными границами необходимы специальные меры. Прежде всего,

необходимо обеспечить в области отрыва значительно более подробную сетку, так как течение вблизи поверхности не может быть описано обычными пристенными функциями. Если не рассматривать прямых методов моделирования ПС (что требует чрезвычайно подробных сеток), применение сеток, обеспечивающих $y^+ < 30$, требует специальных низкорейнольдсовых моделей турбулентности.

Выполненные исследования показали, что для обеспечения условий численного моделирования отрывного течения в корме МСС целесообразно использовать модель турбулентности SST. При этом необходимо измельчить сетку на обтекателе до достижения значений $y^+ \approx 10$. Модифицированная модель SST, используемая в ПК FLOWVISION, при больших y^+ работает как обычная высокорейнольдсовая (аналогично стандартной $k-\epsilon$), поэтому измельчение сетки может быть выполнено локально, с сохранением на остальной части поверхности обычной сетки. Это позволяет сдерживать рост числа расчетных ячеек.

Так как область отрыва находится в подводной части, численное моделирование может быть выполнено для дублированной модели. Добавка к величине вязкостного сопротивления, полученная за счет отрыва, может быть затем использована для корректировки величин буксировочного сопротивления, полученных по обычной методике численного моделирования обтекания.

Расчеты, выполненные по указанным принципам для дублированной модели МСС в модельном масштабе, показали хорошее соответствие эксперименту – рис. 5.5.

Опыт расчетов по другим объектам с подобными обводами кормы показал, что выполнение дополнительного расчета дублированной модели с разрешением предположительной области отрыва (например, всего обтекателя) и моделью SST позволяет с хорошей точностью предсказывать размер отрывной зоны и обусловленное ей сопротивление.

Вместе с тем, описанный способ численного моделирования обтекания корпуса судна с отрывом ПС во многом является компромиссным. Основным его

недостатком является зависимость условий моделирования в области отрыва от масштаба.



Рисунок 5.5 – Зависимость вязкостного сопротивления МСС от особенностей численной постановки в модельном масштабе

Выполнение расчетов в масштабе модели оказывается не только способом приблизить условия к экспериментальным, но и существенно снизить число неизвестных в задаче. При выборе размеров ячеек для разрешения ПС основным критерием является величина y^+ . Если использовать в разных масштабах одну и ту же сетку (размеры ячеек сохраняются относительно объекта), в масштабе натуры происходит резкий рост значений y^+ из-за уменьшения относительной толщины ПС. Поэтому та же сетка не обеспечивает одинаковых условий моделирования ПС в разных масштабах. Требования в натурном масштабе значительно выше, и в настоящее время их сложно удовлетворить.

Таким образом, в численном моделировании обтекание корпуса судна с отрывом ПС существует самостоятельная проблема масштабного эффекта, не связанная прямо с экспериментальным моделированием. Течение в области отрыва в разных масштабах при одной и той же сетке (если игнорировать разные условия по y^+) может существенно отличаться – рис. 5.6. Анализ проблемы затрудняется тем, что с увеличением масштаба происходит ослабление отрыва,

что качественно соответствует и физическим закономерностям. Это усложняет выявление схемного эффекта.

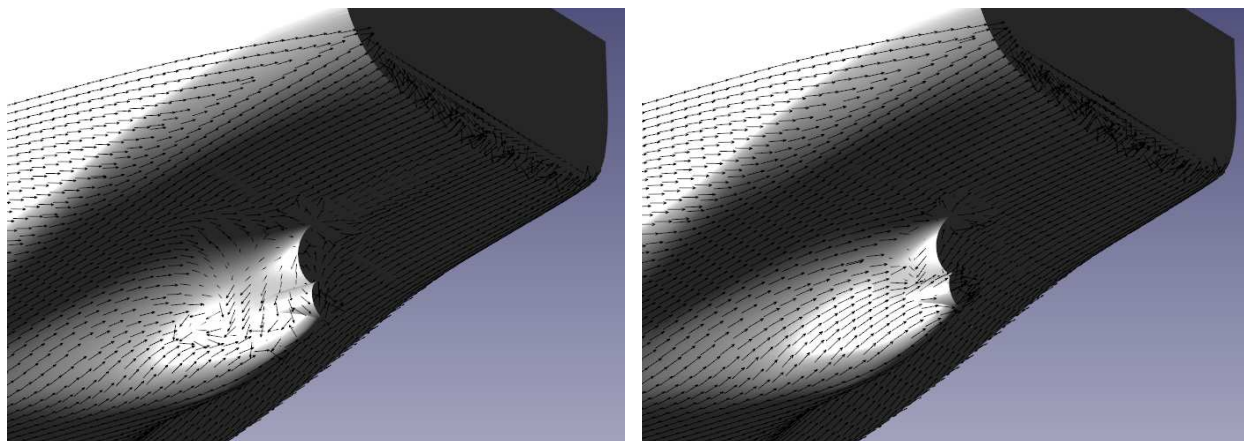


Рисунок 5.6 – Визуализация отрыва ПС векторами скорости: слева в модельном масштабе, справа в натурном

Одним из перспективных подходов к численному моделированию отрывных течений при высоких Re является применение для расчета параметров ПС дополнительных наложенных (или химерных) сеток. При этом подходе снимается необходимость в геометрическом согласовании основной сетки и химерной, и требования к вычислительным ресурсам могут быть существенно ниже, чем при простом измельчении основной сетки до нужных значений y^+ .

Приведенное описание трудностей численного моделирования обтекания судов с отрывом ПС в корме сфокусировано в основном на технологических моментах, важных в практических задачах. С точки зрения гидродинамики отрывное течение представляет собой также весьма сложное явление, пока до конца не изученное на фундаментальном уровне. В последнее время появились работы по его детальному исследованию с помощью численных методов – например, [35].

5.3. Метод оптимальной трансформации носовой части судна

В работе предложен комплексный метод оптимальной трансформации носовой части судна. Его основные компоненты – МСТ формы корпуса и метод снижения сопротивления – являются *научными результатами* работы.

МСТ предусматривает задание изменений на локальных участках строевой по шпангоутам с последующим распределением площадей шпангоутов по высоте одним из известных способов: способом аффинного преобразования [40, с. 211] или способом сдвига [91]. Расширенная МСТ предусматривает комбинацию обоих способов и их усовершенствование для обеспечения переходов между участками, где используется каждый из них.

В МСТ впервые предложено для отображения безразмерного распределения водоизмещения использовать зависимость локального коэффициента продольной полноты от абсциссы $K_{PE}(x)$, которая определяется выражением (3.7).

Наиболее ответственным и, в то же время, пока мало проработанным в МСТ является вопрос о величине и конфигурации изменений на строевой по шпангоутам. Величина и конфигурация изменений определяют важные параметры метода: гибкость модификации формы, обоснованность прогнозов изменений в буксировочном сопротивлении (требования к точности численного моделирования), возможности снижения сопротивления, связь с общепроектными требованиями. В пункте 3.2.2 представлены рекомендации, сформированные в рамках работы, однако они нуждаются в дальнейшем обосновании и расширении.

Предложенный в работе метод снижения сопротивления сформулирован в соответствии с обычным подходом к оптимизационным задачам в современной прикладной гидромеханике. Для иллюстрации такого подхода при обосновании постановки задачи в подразделе 1.3 был приведен пример оптимизации положения элементов механизированного крыла самолета [41].

Новизна метода, главным образом, заключается в использованной в нем гипотезе о независимости влияния разных участков корпуса по длине на волновое сопротивление (пункт 3.2.1). Гипотеза впервые позволяет установить прямую количественную взаимосвязь между локальными трансформациями корпуса и изменением буксировочного сопротивления корпуса. Гипотеза используется для прогноза суммарного эффекта от различных локальных трансформаций.

Метод оптимальной трансформации позволяет выполнять анализ точности прогноза сопротивления усовершенствованных обводов, основанного на гипотезе.

Точность прогноза по результатам совершенствования обводов полного тихоходного ССП составила 79%, судна KCS умеренной полноты и быстроходности – 73%. С практической точки зрения это достаточно высокая точность, вполне оправдывающая использование гипотезы.

Вместе с тем, гипотеза в работе не доказана. Полученные результаты позволяют считать ее правдоподобной. Доказательство гипотезы фактически представляет собой часть решения фундаментальной проблемы сопротивления. Научная ценность использования гипотезы в методе на данном этапе состоит в возможности накопления формализованных данных о ее правдоподобности в различных случаях, анализ которых может в перспективе привести к важным выводам о влиянии формы корпуса на сопротивление.

С методологической точки зрения основная роль гипотезы заключается в экономии вычислительных ресурсов за счет уменьшения количества расчетов. Эта возможность в настоящее время весьма актуальна, поэтому ее использование в практических задачах представляется полезным при условии выполнения предусмотренных проверок достоверности прогноза.

Практические преимущества, которые предоставляет метод оптимальной трансформации носовой части, связаны с расширением методологической базы проектирования судов. Он позволяет оптимизировать параметры формы корпуса (продольное распределение водоизмещения в оконечностях), которые до сих пор не были охвачены формальными методиками или достаточно подробными рекомендациями.

Как показало исследование конкретных объектов в рамках работы, снижение буксировочного сопротивления при этом может достигать больших относительных значений, что обеспечивает существенное улучшение проектных показателей.

5.4. Результаты оптимальной трансформации носовых частей объектов

5.4.1. Теоретические аспекты

В работе выполнено совершенствование носовых обводов двух объектов, которые существенно отличаются друг от друга по форме корпуса и скоростному режиму, – это полное тихоходное ССП с $C_B = 0.892$, $Fr = 0.182$ и судно KCS умеренной полноты и быстроходности с $C_B = 0.651$ и $Fr = 0.282$. Хотя число исследованных объектов минимально, полученные по ним результаты представляют не только практический, но и теоретический интерес.

Если рассмотреть результаты в виде сравнения безразмерных строевых по шпангоутам исходных и усовершенствованных носовых частей объектов (рис. 5.7), можно заметить определенное сходство реализованных изменений. В обоих случаях водоизмещение было перенесено ближе к форштевню за счет заострения участка, лежащего дальше в корму. При качественном сходстве, изменения в каждом случае были неочевидными.

В случае ССП приполнение участка у форштевня, исходя из практики проектирования судов подобного типа, выглядит чрезмерным. Считается, что существенное развитие бульбовых образований не оправдано при скоростных режимах, в которых доля волнового сопротивления невелика. Согласно же полученным результатам, именно приполнение участка у форштевня обеспечило больший вклад в снижение буксировочного сопротивления корпуса, чем заострение участка, расположенного дальше в корму. Эта особенность легла в основу проекта бульбовой наделки на исходные обводы.

В случае судна KCS исходные обводы обладают вполне развитым бульбом. Некоторая оптимизация его размеров была бы вероятной. При этом в режимах с большой долей волнового сопротивления очевидным выгодным направлением изменений считается наращивание размеров бульба, так как это приводит к смещению объема ниже действующей ватерлинии и ее заострению.

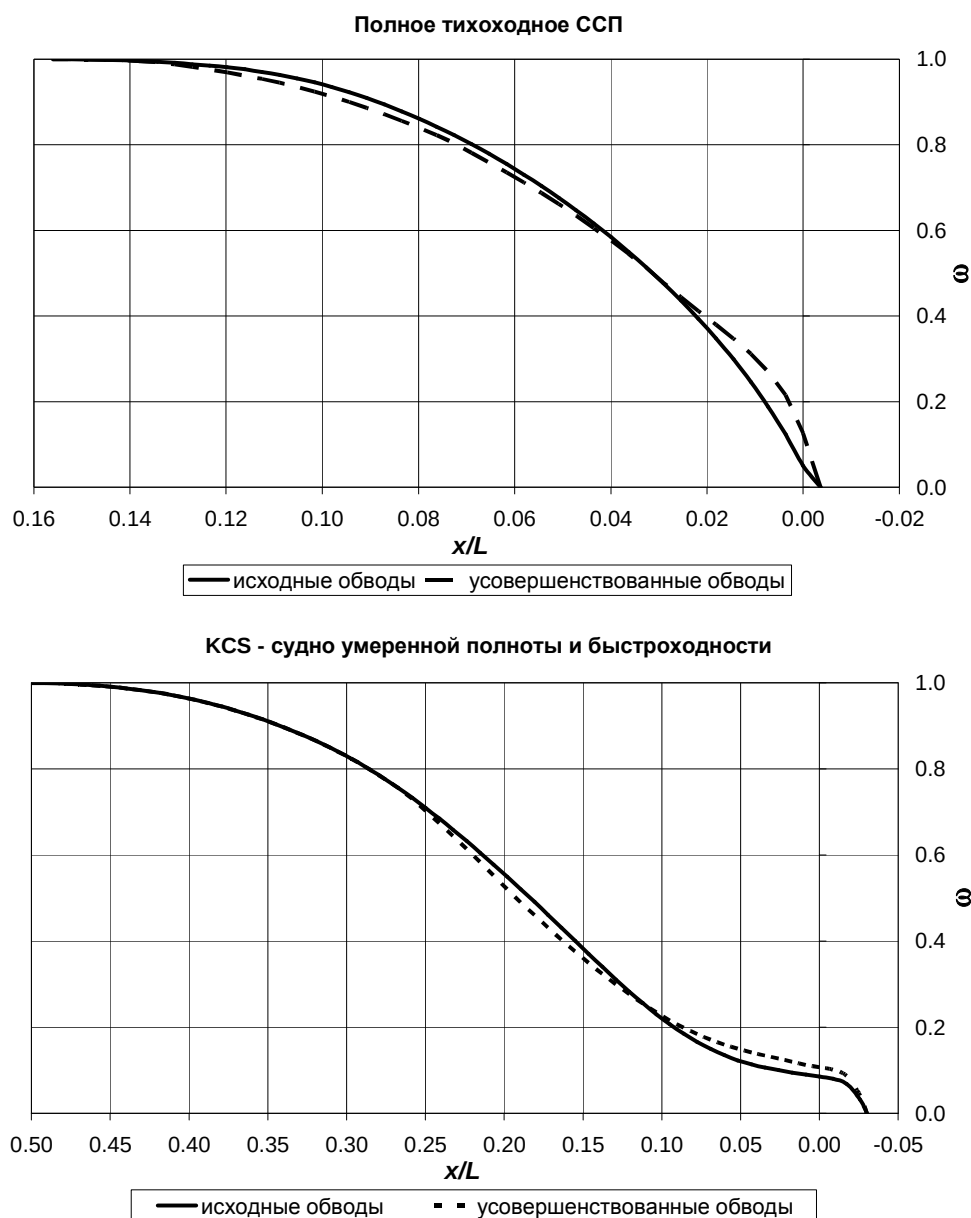


Рисунок 5.7 – Безразмерные строевые по шпангоутам носовых частей

Однако, согласно полученным результатам, эффект от наращивания бульба оказался меньше, чем от заострения участка, примыкающего к нему. Кроме того, влияние трансформаций корпуса на двух участках на вертикальное распределение полноты взаимно компенсируется. То есть наращивание размеров бульба в данном случае не привело к перемещению водоизмещения под свободную поверхность для корпуса в целом.

Исходя из практического опыта, при условии постоянства водоизмещения более выгодным кажется приполнение бульба за счет заострения участка, примыкающего к мидель-шпангоуту, так как это действительно приводит к

смещению водоизмещения к ОП (по причине разного развала шпангоутов в разных районах носовой части). Однако метод оптимальной трансформации показал, что этот путь менее эффективен.

В целом безразмерные строевые двух объектов с усовершенствованными обводами на рис. 5.7 не демонстрируют какой-либо взаимосвязи между собой. Отмеченное сходство изменений может носить и случайный характер. Ситуация меняется, если выполнить сравнение зависимостей $K_{pe}(x)$, в которых исключено влияние общей полноты, – рис. 5.8.

Из рис. 5.8 видно, что зависимости $K_{pe}(x)$ имеют сходный характер у усовершенствованных носовых частей обоих объектов, а также у исходной носовой части судна KCS. Зависимость исходной носовой части ССП по характеру отличается от трех других. Это может объясняться тем, что исходные носовые обводы судна KCS сразу проектировались в расчете на снижение волнового сопротивления. На форме обводов это отразилось в виде развитого бульба. У ССП же явное развитие бульба произошло уже в процессе совершенствования исходных таранно-конических обводов.

Несмотря на подобие кривых $K_{pe}(x)$ усовершенствованных объектов на рис. 5.8, прямо сопоставлять их вряд ли целесообразно из-за разной шкалы абсцисс. В качестве абсциссы выступает относительное положение по длине судна x/L – чисто геометрическая характеристика. Из-за разной относительной длины носовых оконечностей судов эти шкалы у них не совпадают.

Если предположить, что определенная форма кривой $K_{pe}(x)$ в общем случае взаимосвязана с особенностями обтекания носовой оконечности, то такая кривая должна быть построена в координатах, учитывающих, прежде всего, скоростной режим судна Fr .

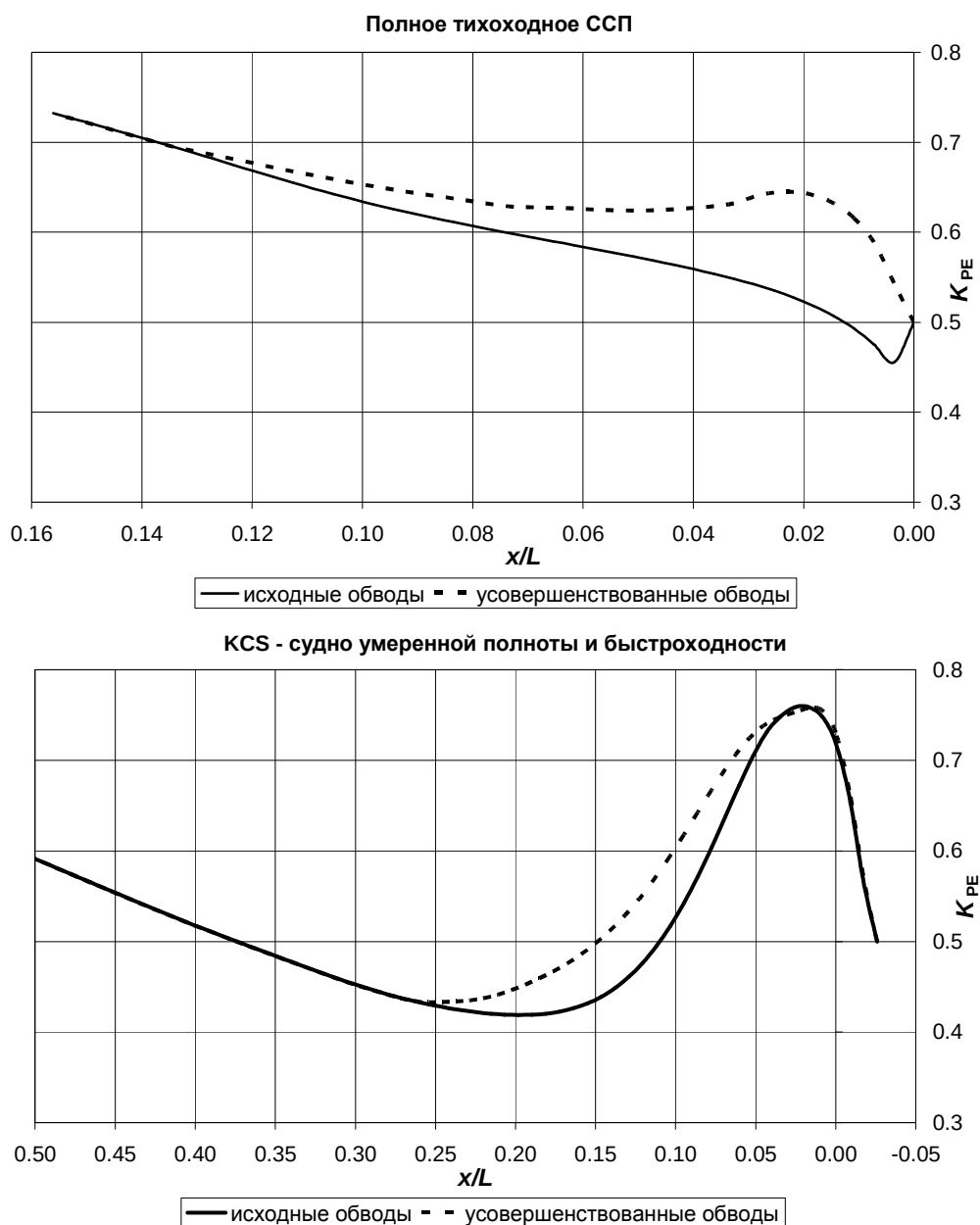


Рисунок 5.8 – Зависимости $K_{RE}(x/L)$ носовых частей

В качестве такой продольной координаты можно использовать длину поперечной волны λ_w , которую нетрудно определить по выражению:

$$\lambda_w = \frac{2\pi V^2}{g}. \quad (5.1)$$

На рис. 5.9 представлены кривые $K_{RE}(x)$ носовых частей усовершенствованных объектов, построенные вдоль единой безразмерной оси x/λ_w .

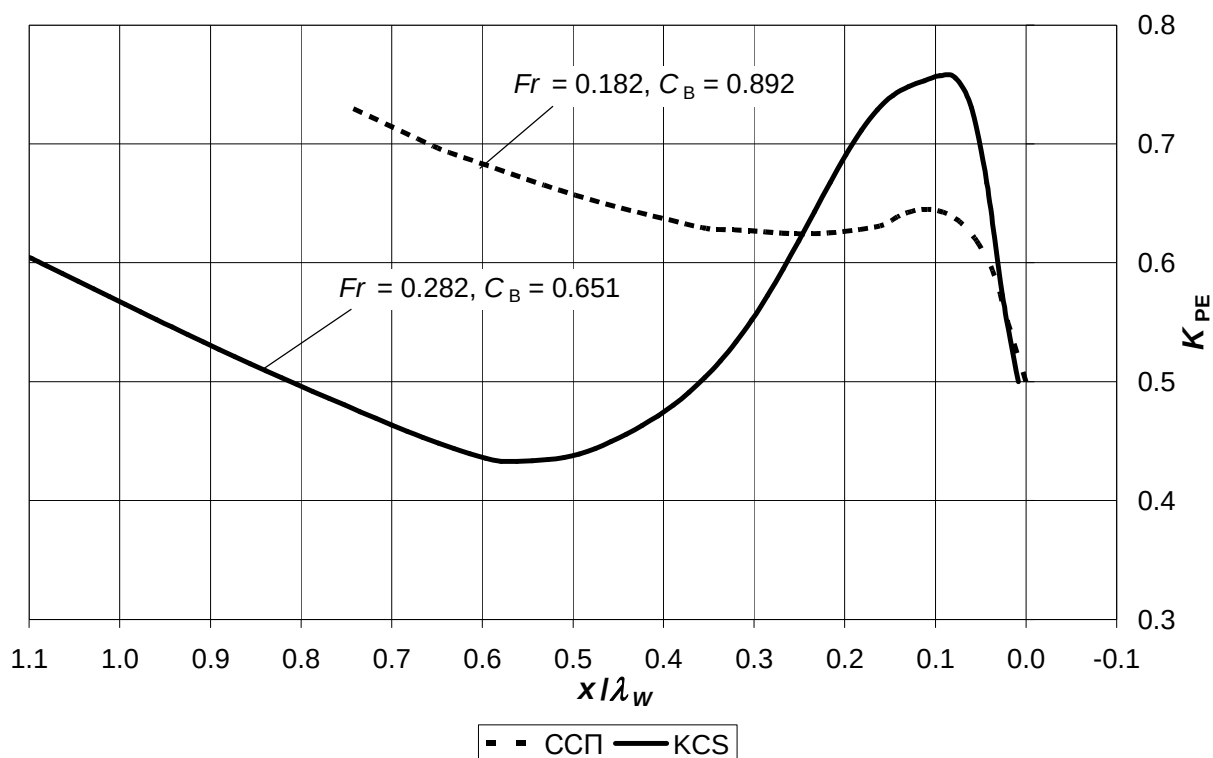


Рисунок 5.9 – Зависимости $K_{RE}(x/\lambda_w)$ усовершенствованных носовых частей

Кривые на рис. 5.9 имеют подобный характер, несмотря на весьма большую разницу в форме обводов и скоростном режиме объектов. Следовательно, функция $K_{RE}(x)$, составленная по выражению (3.7), может служить не только геометрической характеристикой, выражающей распределение полноты в носовой части, но и критерием качества обводов. Для этого продольное распределение полноты следует сопоставить длине поперечных волн λ_w , определяемой по выражению (5.1). Это дает основание сформулировать (в виде гипотезы) следующее **научное положение**:

Влияние формы носовой части на волновое сопротивление судна определяется зависимостью локального коэффициента продольной полноты K_{RE} от продольной координаты x , отнесенной к длине поперечной волны λ_w .

Из формулировки следует вывод о том, что для каждого конкретного случая, определяемого Fr и соотношениями главных размерений, включая C_B , существует оптимальная форма кривой $K_{RE}(x)$, соответствующая минимальному волновому сопротивлению. Судя по исследованным объектам, такая форма имеет максимум вблизи форштевня, что характерно для бульбообразных обводов.

5.4.2. Практические аспекты

Полученные результаты показали, что для судов умеренной полноты и быстроходности, подобных KCS, снижение буксировочного сопротивления за счет оптимизации формы носовой оконечности может достигать относительно высоких значений. В рамках работы для KCS было получено снижение сопротивления 8.9%. При этом характер носовых обводов принципиально не был изменен. Судя по этим результатам, в режимах с развитым волнообразованием сравнительно небольшие трансформации корпуса существенно влияют на величину буксировочного сопротивления. Поэтому, даже в целом правильно выбранные в соответствии с обычными рекомендациями и инженерным опытом обводы могут иметь значительные резервы для оптимизации. Это подтверждает практическую актуальность предложенного метода оптимальной трансформации носовой части.

Результаты совершенствования носовых обводов ССП показали, с одной стороны, что выигрыш в буксировочном сопротивлении может быть относительно небольшим при существенном изменении характера обводов. Для ССП – объекта численного исследования (подраздел 3.3) – в работе было получено снижение сопротивления 4.1%. Очевидно, это связано с небольшой долей волнового сопротивления. С другой стороны, выигрыш зависит от того, насколько исходные обводы далеки от оптимальных. Для ССП близкого типа, послужившего объектом экспериментального исследования (раздел 4), снижение сопротивления составило уже 15.6%.

Исходные носовые обводы объекта экспериментального исследования (раздел 4) близки к обводам первых судов класса «Волго-Дон макс» нового поколения. Примером могут служить танкеры типа «Армада Лидер» проекта 005RST01 Морского Инженерного Бюро (МИБ) постройки 2002 – 2005 гг. – рис. 5.10. Форма носовых таранно-конических обводов характерна заострением участка у форштевня.



Рисунок 5.10 – Носовая часть ССП типа «Армада Лидер» (проект 005RST01)

Исходные носовые обводы объекта численного исследования (подраздел 3.3) были разработаны при участии автора и использованы в проектах сухогрузных судов МИБ 006RSD02, 006RSD05, RSD19 и RSD49, которые находятся в постройке с 2003 г. по настоящее время (построено 22 судна). Обводы проектировались с учетом опыта по первым судам. Участок у форштевня у них стал заметно полнее – рис. 5.11.



Рисунок. 5.11 – Носовая часть ССП
типа «Гейдар Алиев» (проект
006RSD05)



Рисунок 5.12 – Носовая часть ССП
«СВЛ Либерти» (проект RST27)

Источник: [56]

При разработке обводов для ССП с экстремально высоким коэффициентом общей полноты в рамках проекта МИБ RST27 [10], автором было предложено

наращивать водоизмещение в основном путем дальнейшего приполнения носовой части, особенно участка у форштевня – рис. 5.12. Это решение не имело научного обоснования, его целесообразность была проверена в результате комплекса численных и экспериментальных исследований, полностью подтвержденных результатами сдаточных испытаний.

Таким образом, результаты совершенствования носовых обводов ССП соответствуют современной практике проектирования. Результаты работы подводят под наметившуюся в практике тенденцию теоретическую базу.

Результаты по ССП отличаются высокой готовностью к использованию в новых проектах, особенно для судов класса «Волго-Дон макс».

В первую очередь это относится к обоснованию бульбовой наделки на существующие носовые обводы. Как отмечено выше, к настоящему времени построено уже 22 судна с носовыми обводами, рассмотренными в работе, для которых актуально это решение. Ниже в таблице 5.3 представлена предварительная оценка экономической целесообразности установки наделки. Оценка предполагает, что наделка изготовлена заранее и устанавливается во время ближайшего докового ремонта.

Из таблицы 5.3 видно, что стоимость сэкономленного топлива превышает стоимость затрат на изготовление и установку наделки уже в течение первого года эксплуатации, то есть срок окупаемости составляет менее одного года. Экономическая эффективность подобных решений, вообще говоря, очевидна, если они обеспечивают заметную экономию топлива, так как работы по корпусным конструкциям являются в судостроении относительно дешевыми, в то время как затраты на топливо, как правило, составляют основную долю эксплуатационных расходов.

Таблица 5.3 – Оценка экономической целесообразности установки бульбовой наделки

Расчет стоимости затрат		Расчет стоимости сэкономленного топлива	
Площадь обшивки наделки, м ²	53.7	Суточный расход топлива ГД при скорости 11 узлов, т/сут.	7.700
Толщина обшивки, мм	10	Экономия топлива, %	5
Объем металла обшивки, м ³	0.54	Экономия топлива, т/сут.	0.385
Масса металла обшивки, т	4.20	Число ходовых суток в год в грузу	100
Коэффициент учета массы набора	1.3	Экономия топлива, т/год	38.5
Масса обшивки с набором, т	5.45	Стоимость 1 т моторного топлива, долл. США	1000
Стоимость обработки 1 кг металла, долл. США	5	Стоимость сэкономленного в течение года топлива, тыс. долл. США	38.5
Стоимость изготовления наделки, тыс. долл. США	27.2		

5.5. Выводы по разделу 5

В ходе анализа результатов работы обоснована их достоверность, сформулированы основные научные и практические аспекты, а также перспективные направления дальнейших исследований.

Методика численного моделирования обтекания судна имеет самостоятельное практическое значение, так как может использоваться не только в рамках метода, но и для определения сопротивления судов и отработки обводов обычными способами. Возможность использования методики в случаях, когда проявляются масштабные эффекты, связанные с обтеканием кормовой части, обоснована результатами специального исследования проблемы масштабного эффекта в численном моделировании.

Метод оптимальной трансформации носовой части судна расширяет методологическую базу проектирования судов и позволяет повысить их проектные показатели. Метод имеет несколько перспективных направлений

развития, связанных с совершенствованием его функционирования и расширением области применения.

Анализ характеристик оптимального продольного распределения водоизмещения в носовых частях двух рассмотренных объектов позволил сформулировать новое научное положение.

Научная новизна результатов раздела состоит в следующем. В результате обобщающего анализа усовершенствованных с помощью метода носовых обводов судов *впервые* установлено, что влияние формы носовой части на волновое сопротивление судна определяется зависимостью локального коэффициента продольной полноты от продольной координаты, отнесенной к длине поперечной волны. Использование указанной зависимости способствует упрощению и формализации задачи поиска формы носовой части, обеспечивающей минимальное полное сопротивление судна.

Основные результаты раздела опубликованы в [46], дополнительно отражает результаты раздела статья [48].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача повышения технико-эксплуатационных и экономических показателей судов путем снижения сопротивления движению за счет оптимальной трансформации носовой части корпуса.

Основные результаты диссертационной работы:

1. ***Усовершенствована*** методика численного моделирования процесса обтекания судовых корпусов путем включения в нее рекомендаций по назначению продольных размеров расчетной области для судна заданных главных размерений, а также по формированию областей концентрации ячеек прямоугольной расчетной сетки, разрешающей обтекающий судовой корпус поток. Усовершенствования методики, выполненные на основе систематизации параметров и результатов произведенного моделирования обтекания корпусов 47 судов различной формы и скоростных режимов движения, обеспечили выполнение расчетов буксировочного сопротивления эталонных судов с точностью, соответствующей уровню современных мировых стандартов в сравнении с надежными данными экспериментальных исследований.
2. ***Впервые*** предложена математическая модель систематических трансформаций формы корпуса, основополагающим принципом которой явилось использование локального коэффициента продольной полноты в качестве характеристики продольного распределения водоизмещения. Модель осуществляет варьирование величины и продольного распределения водоизмещения носовой части корпуса путем изменения ограниченных участков ее поверхности, что позволяет исследовать тонкие эффекты влияния относительно малых трансформаций судовой поверхности на буксировочное сопротивление, при которых изменения водоизмещения составляют порядка десятых долей процента.
3. На базе предложенной модели систематических трансформаций разработан метод снижения сопротивления движению судна, в основу

которого ***впервые*** введено предположение о независимости влияния формы разных участков носовой части корпуса, выделенных по длине судна, на его буксировочное сопротивление. Метод обеспечивает надежную оценку влияния трансформаций судовой поверхности на буксировочное сопротивление и позволяет определять комбинацию трансформаций, соответствующую оптимальной форме носовой части по критерию минимального удельного сопротивления корпуса судна.

4. ***Получило дальнейшее развитие*** исследование задачи о влиянии формы судового корпуса на его буксировочное сопротивление на основе анализа результатов применения метода к двум разным по характеру обводов и скоростному режиму судам, которые были подтверждены для одного из них специальным экспериментальным исследованием в опытовом бассейне. Согласно данным выполненных исследований, продольное перераспределение водоизмещения в носовой части судов является главным фактором в снижении их буксировочного сопротивления.
5. В результате обобщающего анализа усовершенствованных с помощью метода носовых обводов судов ***впервые*** установлено, что влияние формы носовой части на волновое сопротивление судна определяется зависимостью локального коэффициента продольной полноты от продольной координаты, отнесенной к длине поперечной волны. Использование указанной зависимости способствует упрощению и формализации задачи поиска формы носовой части, обеспечивающей минимальное полное сопротивление судна.

Достоверность теоретических и практических результатов работы обеспечена за счет корректной постановки задачи, использованных теоретических и экспериментальных методов ее решения.

Рекомендации по использованию результатов работы.

Метод оптимальной трансформации может эффективно применяться для обоснования продольного распределения водоизмещения в носовой части

проектируемых и модернизируемых судов, что позволит повысить качество проектного процесса и улучшить проектные показатели.

Результаты применения метода имеют теоретические и практические аспекты. Метод позволяет систематизировать данные о влиянии формы корпуса на сопротивление, которые рекомендуется использовать для дальнейшего развития научной проблемы сопротивления. Метод позволяет разрабатывать оптимальную форму носовой части при проектировании и модернизации судов.

Рекомендации по дальнейшему развитию проблемы.

Анализ метода оптимальной трансформации носовой части судна показал, что он имеет большие возможности дальнейшего развития и расширения области использования. Прежде всего, можно рассмотреть не только носовые обводы, а форму корпуса в целом. Далее, не ограничиваясь задачей снижения буксировочного сопротивления, можно рассмотреть задачу повышения ходовых качеств судна на тихой воде. Для этого нужно дополнить метод данными по взаимодействию между корпусом и движителями, которые могут быть получены с помощью соответствующих численных расчетов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Апухтин П.А., Войткунский Я.И. Сопротивление воды движению судов [Текст] / П.А. Апухтин, Я.И. Войткунский. – Л.: Машгиз, 1953. – 340 с.
2. Борисов Е.А. Украинский корвет. Первые штрихи [Текст] / Е.А. Борисов // Судостроение и судоремонт. – 2009. – № 32. – С. 34–35.
3. Ван-Ламмерен, Троост, Конинг. Сопротивление, пропульсивные качества и управляемость судов: пособие для проектирования формы корпуса, гребных винтов и рулей [Текст] : пер. с англ. / Д. Дорогостайский и А. Фишер. – Л.: Судпромгиз, 1957. – 387 с.
4. Вишневский Л.И., Егоров Г.В., Станков Б.Н., Печенюк А.В. Проектирование пропульсивного комплекса судна ограниченного района плавания на базе современных методов вычислительной гидродинамики [Текст] / Л.И. Вишневский, Г.В. Егоров, Б.Н. Станков, А.В. Печенюк // Судостроение. – 2006. – № 2. – С. 27–31.
5. Готман А.Ш. Определение волнового сопротивления и оптимизация обводов судов [Текст] / А.Ш. Готман. – Новосибирск: НГАВТ, 1995. – Части 1 и 2. – 320 с.
6. Давыдов И.Ф., Демидюк А.В., Печенюк А.В. Экспериментальное исследование усовершенствованных обводов для тихоходного судна большой полноты [Текст] / И.Ф. Давыдов, А.В. Демидюк, А.В. Печенюк // Shipbuilding and Marine Infrastructure, 2015. – № 2 (4). – С. 144–150.
7. Давыдов И.Ф., Демидюк А.В., Печенюк А.В. Экспериментальное исследование улучшенных обводов для тихоходного судна большой полноты [Текст] / И.Ф. Давыдов, А.В. Демидюк, А.В. Печенюк // Программа и материалы III междун. науч.-технич. конф. «Экспериментальные методы теории корабля». – Николаев: НУК, 2014. – С. 11–15.
8. Девнин С.И. Аэрогидромеханика плохобтекаемых конструкций [Текст] : Справочник. – Л.: Судостроение, 1983. – 320 с.

9. Демидюк А.В. Модернизация системы измерений опытового бассейна ОНМУ [Текст] / А.В. Демидюк // Вісник ОНМУ: збірник наукових праць. – Одеса: ОНМУ, 2012. – Вип. 34. – С. 67–76.
10. Егоров Г.В., Тонюк В.И., Станков Б.Н., Печенюк А.В. Исследования ходкости судна смешанного река-море плавания с предельно высоким коэффициентом общей полноты [Текст] / Г.В. Егоров, В.И. Тонюк, Б.Н. Станков, А.В. Печенюк // Материалы III междун. научно-техн. конф. «Инновации в судостроении и океанотехнике» – Николаев: НУК, 2012. – С. 92–93.
11. Егоров Г.В., Штрамбранд В.И., Автутов Н.В. Многофункциональное лоцмейстерское судно проекта BLV01 для ФГУП "Росморпорт" [Текст] / Г.В. Егоров, В.И. Штрамбранд, Н.В. Автутов // Судостроение. – 2013. – № 1. – С. 18–24.
12. Егоров Г.В. Многофункциональный арктический ледокол нового поколения [Текст] / Г.В. Егоров // Вестник транспорта. – 2008. – № 11. – С. 7–8.
13. Егоров Г.В., Тонюк В.И. Многоцелевое сухогрузное судно пр. DСV36 дедвейтом около 5000 тонн [Текст] / Г.В. Егоров, В.И. Тонюк // Судостроение и судоремонт. – 2012. – № 4 – 5 (54–55). – С. 12–23.
14. Егоров Г.В., Тонюк В.И. Морские водолазные суда типа «Стольный град Ярославль» [Текст] / Г.В. Егоров, В.И. Тонюк // Судостроение. – 2012. – № 3. – С. 17–23.
15. Егоров Г.В., Станков Б.Н., Печенюк А.В. Опыт использования CFD-моделирования при проектировании пропульсивного комплекса судна [Текст] / Г.В. Егоров, Б.Н. Станков, А.В. Печенюк // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007. – № 2. – С. 3–11.
16. Егоров Г.В., Ильницкий И.А., Исупов Ю.И. Особенности сухогрузных судов типа «Волго-Дон макс» нового поколения [Текст] / Г.В. Егоров, И.А. Ильницкий, Ю.И. Исупов // Труды НТК по СМК памяти проф. П. Ф. Папковича. – СПб: ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова, 2005. – С. 10 – 11.

17. Егоров Г.В., Алекперов Р.А., Тонюк В.И. Первое сухогрузное судна класса "Азов макс" [Текст] / Г.В. Егоров, Р.А. Алекперов, В.И. Тонюк // Судостроение. – 2007. – № 1. – С. 12–16.
18. Егоров Г.В., Печенюк А.В. Применение методов вычислительной гидромеханики при проектировании корпуса контейнеровоза [Текст] / Г.В. Егоров, А.В. Печенюк // Проблемы техники. – 2008. – № 3. – С. 3–15.
19. Егоров Г.В., Хаустов А.В., Автутов Н.В. Серия многофункциональных аварийно-спасательных судов мощностью 4 МВт ледового плавания проекта MPSV07 типа «Спасатель Карев» [Текст] / Г.В. Егоров, А.В. Хаустов, Н.В. Автутов // Судостроение. – 2014. – № 1. – С. 18–25.
20. Егоров Г.В. Суда смешанного плавания для "северного завоза" [Текст] / Г.В. Егоров // Материалы междун. научно-техн. конф. "Инновации в судостроении и океанотехнике" – Николаев: НУК, 2010. – С. 32– 33.
21. Егоров Г.В., Тонюк В.И., Дурнев Е.Ю. Танкер смешанного река-море плавания пр. RST25 дедвейтом в реке/в море 5220/6700 тонн [Текст] / Г.В. Егоров, В.И. Тонюк, Е.Ю. Дурнев // Судостроение и судоремонт. – 2014. – № 59. – С. 16–29.
22. Егоров Г.В., Тонюк В.И., Калугина Н.Н. Три многофункциональных мелкосидящих буксира-снабженца проекта TG05 для Северного Каспия [Текст] / Г.В. Егоров, В.И. Тонюк, Н.Н. Калугина // Судостроение. – 2014. - № 4. – С. 25–29.
23. Жуковский Н.Е. О спутной волне [Текст] / Н.Е. Жуковский // Жуковский Н.Е. Полное собрание сочинений: В 10 томах. Т. 4. / под ред. проф. А.П. Котельникова. – М.– Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1937. – С. 38–52.
24. Исследование ходовых качеств сухогрузного судна смешанного река-море плавания дедвейтом 7000 тонн [Текст] : отчет о НИР (заключит.) / ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова; рук. Каневский Г.И. – СПб, 2009. – 53 с. – Выпуск № 43433.
25. Исследование ходовых и мореходных качеств танкера смешанного река-море плавания нового поколения [Текст] : отчет о НИР (заключит.) / ГНЦ РФ

- ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова»; рук. Каневский Г.И. – СПб, 2010. – 68 с. – Выпуск № 45583.
26. Калиткин Н.Н. Численные методы [Текст] / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
 27. Кацман Ф.М., Пустошный А.Ф., Штумпф В.М. Пропульсивные качества морских судов [Текст] / Ф.М. Кацман, А.Ф. Пустошный, В.М. Штумпф. – Л.: Судостроение, 1972. – 510 с.
 28. Клепиков А.В. Новый экономичный буксирный катер пр. 3048М [Текст] / А.В. Клепиков // Судостроение и судоремонт. – 2014. – № 59. – С. 36–37.
 29. Костюков А.А. К выбору формы ватерлиний корабля [Текст] / А.А. Костюков // Изв. АН СССР, ОТН., 1955. – № 10. – С. 166 – 169.
 30. Костюков А.А. Сопротивление воды движению судов [Текст] / А.А. Костюков. – Л.: Судостроение, 1966. – 448 с.
 31. Кочин Н.Е. Собрание сочинений [Текст] / Н.Е. Кочин. – М.–Л.: Изд. АН СССР, 1949. – Т. I. – 615 с., Т. II. – 587 с.
 32. Крейн М.Г., Сизов В.Г. О нестандартности вариационных задач об оптимальной форме судна [Текст] / М.Г. Крейн, В.Г. Сизов // Труды юбилейной научной сессии БИГС. – Варна, 1981. – С. 77–1–5.
 33. Крейн М.Г. О форме судна наименьшего мичеллевского сопротивления [Текст] // Аннотации докл. АН СССР на Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике. – М., 1960. – С. 111–115.
 34. Линдблад А. Проектирование обводов транспортных судов [Текст] : пер. с англ. / Э. Логвинович. – Л.: Судостроение, 1965. – 127 с.
 35. Лобачев М.П. Исследование особенностей течения вязкой жидкости в кормовой оконечности судов с полными обводами [Текст] / М.П. Лобачев // Труды Крыловского гос. научного центра. – СПб.: Крыловский гос. научный центр, 2013. – Вып. 78 (362). – С. 5–28.
 36. Мизин И.О., Солопов В.А., Суженис Э.Н. Математическое описание судовой поверхности в задаче оптимизации элементов судна [Текст] / И.О. Мизин,

- В.А. Солопов, Э.Н. Суженис // В сб. Вопросы судостроения. – Л.: Судостроение, 1977. – Вып. 13, С. 20–26.
37. Моделирование отрывных течений в программном комплексе FlowVision-НРС [Текст] / С.В. Жлуктов, А.А. Аксенов, С.А. Харченко и др. // Вычислительные методы и программирование. – 2010. – Т. 11.
 38. Модельные исследования характеристик ходкости и расчеты вибрации корпуса сухогрузного судна проекта DCV36 [Текст] : отчет о НИР (заключит.) / ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова; рук. Щемелинин Л.Г.; исполн.: Дмитренко А.С. [и др.]. – СПб, 2008. – 62 с. – Выпуск № 44646.
 39. Морозова И.В., Баскаков С.Н. 80-летие опытового бассейна Одесского национального морского университета [Текст] / И.В. Морозова, С.Н. Баскаков // Вісник ОНМУ: збірник наукових праць. – Одеса: ОНМУ, 2013. – Вип. 37. – С. 3–7.
 40. Ногид Л.М. Проектирование формы судна и построение теоретического чертежа [Текст] / Л.М. Ногид. – Л.: Судостроение, 1962. – 243 с.
 41. Оптимизация положения элементов механизированного крыла с использованием программных комплексов FlowVision-НРС и IOSO [Текст] / А.С. Шишаева, И.В. Москалев, С.В. Жлуктов и др. // САПР и графика. – 2010. – № 9.
 42. Павленко Г.Е. Сопротивление воды движению судов [Текст] / Г.Е. Павленко. – М.: Морской транспорт, 1956. – 507 с.
 43. Павленко Г.Е. Судно наименьшего сопротивления [Текст] / Г.Е. Павленко // Труды ВНИТОСС, 1937. – Т. II. – Вып. 3. – С. 28–62.
 44. Пашин В.М. Оптимизация судов: системный подход – математические модели [Текст] / В.М. Пашин. – Л.: Судостроение, 1983. – 296 с.
 45. Пашин В.М., Мизин И.О. Согласованная оптимизация формы корпуса и основных элементов судна [Текст] / В.М. Пашин, И.О. Мизин // В сб. Гидродинамика транспортных судов. – Л.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1981. – С. 27–44.

46. Печенюк А.В. Метод оптимальной трансформации носовой части судна в задаче снижения полного сопротивления его движению на тихой воде [Текст] / А.В. Печенюк // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2016. – № 2. – С. 40–45.
47. Печенюк А.В. Модель изменений судовой поверхности [Текст] / А.В. Печенюк // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК. 2012. – С. 179–181.
48. Печенюк А.В. О повышении эффективности пропульсивного комплекса путем совершенствования формы носовой оконечности судна [Текст] / А.В. Печенюк // Судовые энергетические установки. – 2014. – № 34. – С. 87-97.
49. Печенюк А.В. Оптимизация судовых обводов для снижения сопротивления движению [Текст] / А.В. Печенюк // Инженерные системы – 2015: Труды Международного форума / Инжиниринговая компания «ТЕСИС». – М.: МАКС Пресс, 2015. – С. 60–69.
50. Печенюк А.В. Совершенствование обводов судна KCS умеренной полноты и быстроходности численными методами [Текст] / А.В. Печенюк // Тез. докл. всеукр. науч.-технич. конф. «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». – Николаев: НУК, 2015. – С. 121–123.
51. Печенюк А.В. Улучшение формы корпуса тихоходного судна с большой полнотой обводов численными методами [Электронный ресурс] / А.В. Печенюк // Тез. докл. всеукр. науч.-технич. конф. «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». – Николаев: НУК, 2014. – Режим доступа: <http://conference.nuos.edu.ua> (дата обращения 16.12.2014).
52. Печенюк А.В. Эталонное тестирование ПК FlowVision в задаче моделирования обтекания судового корпуса [Текст] / А.В. Печенюк // Инженерные системы – 2014: Труды Международного форума / Инжиниринговая компания «ТЕСИС». – М.: МАКС Пресс, 2014. – С. 43–47.

53. Печенюк А.В. Эталонное тестирование ПК FlowVision в задаче моделирования обтекания судового корпуса [Текст] / А.В. Печенюк // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6. – С. 889–899.
54. Печенюк А.В., Сизов В.Г. Методы улучшения судовых обводов [Текст] / А.В. Печенюк, В.Г. Сизов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК. 2012. – С. 176–178.
55. Программный комплекс FlowVision как современный инструмент проектирования судовых обводов [Текст] / А.А. Аксенов, С.В. Жлуктов, А.С. Петров и др. // Судостроение. – 2013. – № 4. – С. 27–31.
56. Сайт МИБ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.meb.com.ua/> (дата обращения 08.10.2015).
57. Сайт программного продукта FlowVision [Электронный ресурс] / ООО «ТЕСИС». – Режим доступа: <http://www.flowvision.ru/> (дата обращения 05.10.2015).
58. Сайт программного продукта T-FLEX [Электронный ресурс] / ЗАО «Топ Системы». – Режим доступа: <http://www.tflex.ru/> (дата обращения 13.10.2015).
59. Сизов В.Г. К теории волнового сопротивления судна на тихой воде [Текст] / В.Г. Сизов // Изв. АН СССР, ОТН, Мех. и маш. – 1961. – № 1. – С. 75–85.
60. Сизов В.Г. Метод проектирования формы корабля наивысших пропульсивных качеств [Текст] : дис... канд. техн. наук : 05.08.01 «Теория корабля» / В.Г. Сизов – ОИИМФ, Одесса, 1948. – 120 с.
61. Сизов В.Г. Об одном способе улучшения формы судна [Текст] / В.Г. Сизов // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2006. – Вип. 19. – С. 14–19.
62. Сизов В.Г. Теоретическое исследование волнового сопротивления судна [Текст] : дис... д-ра техн. наук : 05.08.01 «Теория корабля» / В.Г. Сизов – ОВИМУ, Одесса, 1969. – 280 с.
63. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. 4. [Текст] / В.И. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1951. – С. 223.

64. Справочник по теории корабля: в 3 т. [Текст] / под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – Т. 1. – 768 с.
65. Сретенский Л.Н. Теоретическое исследование волнового сопротивления: Глава 1. К теории Мичелла [Текст] / Л.Н. Сретенский // Сб. науч. трудов ЦАГИ. – М.: ЦАГИ, 1937. – Вып. 319. – С. 3–55.
66. Станков Б.Н., Печенюк А.В. Оптимизация судовых обводов: новые возможности [Текст] / А.В. Печенюк, Б.Н. Станков // Судостроение. – 2015. – № 3. – С. 15–19.
67. Станков Б.Н., Печенюк А.В. Цифровые технологии в проектировании судов: использование комплекса FlowVision [Текст] / А.В. Печенюк, Б.Н. Станков // САПР и графика. – 2015. – № 3. – С. 78–82.
68. Турбал В.К., Шпаков В.С., Штумпф В.М. Проектирование обводов и движителей морских транспортных судов [Текст] / В.К. Турбал, В.С. Шпаков, В.М. Штумпф. – Л.: Судостроение, 1983. – 301 с.
69. Ханович И.Г. Теория корабля [Текст] / И.Г. Ханович. – М.–Л.: Военмориздат, 1939. – С. 375–383.
70. Ходкость и управляемость судов: учебник для вузов [Текст] / В.Ф. Бавин, В.И. Зайков, В.Г. Павленко, Л.Б. Сандлер; Под ред. В.Г. Павленко. – М.: Транспорт, 1991. – 397 с.
71. Экспериментальная оценка ходовых качеств судна пр. MPSV07, разработка рекомендаций по корректировке обводов корпуса, измерение параметров качки, расчеты управляемости судна при ветре [Текст] : отчет о НИР (заключит.) / Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций; рук. Гофман А.Д. – СПб, 2008. – 47 с. – дог. № 28-113.
72. Aksenov A., Dyadkin A., Pokhilko V. Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method [Текст] / A. Aksenov, A. Dyadkin, V. Pokhilko // Proc. 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference. – San Diego: ASME PVP. – Vol 377-1, 1998.
73. Aksenov A.A., Pechenyuk A.V., Vučinić D. Ship hull form design and optimization based on CFD [Текст] / A.A. Aksenov, A.V. Pechenyuk, D. Vučinić

- // Proc. of 16th Int. Congress of IMAM (IMAM-2015). – Pula, Croatia, 21–24 September, 2015. – P. 215–223.
74. CAE Simulation of Water Flow Around a Ship Hull [Текст] / A. Jackson, J. Lorenzana, A. Pechenyuk et al. // The UberCloud HPC Experiment: Compendium of Case Studies. – 2013.
 75. A comparison between the parabolic and partially-parabolic solution procedures for three-dimensional turbulent flows around ships' hulls [Текст] / Abdelmeguid A. M. [et al.] // Appl. Math. Modelling. – 1979. – Vol. 3. – P. 249–258.
 76. Dawson C.W. A practical computer method for solving ship-wave problems [Текст] / C.W. Dawson // Proc. 2-nd Int. Conf. Numer. Ship Hydrodyn. – Berkeley, 1977. – P. 30–38.
 77. Design of Hull Lines Using Modern CFD Software Package Flowvision [Текст] / A.A. Aksenov, S.V. Zhluktoy, A.S. Petrov et al. // Proc. of 3rd National CFD Conf. of Shipbuilding and Marine Engineering. – Dalian, China, 25–26 July, 2014. – P. 262–267.
 78. Execution of checking experimental investigation of hydrodynamic characteristics rescue ship project MPSV07 [Текст] : Work report (final) / Krylov Shipbuilding Research Institute. – St. Petersburg, 2009. – 60 p. – Issue No. FIN-V-10/2009.
 79. FlowVision, версия 3.08.04 (2013): Руководство пользователя [Текст] / ООО ТЕСИС. – М.: ООО ТЕСИС, 2013. – 348 с.
 80. Gadd G.E. A method of computing the flow and surface wave pattern around hull forms [Текст] / G.E. Gadd // Trans. Roy. Inst. Nav. Arch. – London, 1976. – V. 188. – P. 207–219.
 81. Guide to the Expression of Uncertainty in Experimental Hydrodynamics 7.5-01-01 [Электронный ресурс] / ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, 2008. – 17 с. – Режим доступа:
<http://ittc.info/downloads/Archive%20of%20recommended%20procedures/2011%20Recommended%20Procedures/7.5-02-01-01.pdf> (дата обращения 12.10.2015).

82. Guidelines for Uncertainty Analysis in Resistance Towing Tests 7.5-02-02 [Электронный ресурс] / ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, 2008. – 16 с. – Режим доступа:
<http://itcc.info/downloads/Archive%20of%20recommended%20procedures/2011%20Recommended%20Procedures/7.5-02-02-02.pdf> (дата обращения 12.10.2015).
83. Havelock T. H. Wave patterns and wave resistance [Текст] / Т. Н. Havelock // Trans. Inst. Naval Arch. – 1934. – V. 76. – P. 430–446.
84. Hess J.L., Smith A.K.O. Calculation of nonlifting potential flow about arbitrary three-dimensional bodies [Текст] / J.L. Hess, A.K.O. Smith // J. Ship Res. – N.-Y., 1964. – V. 9. – No 2. – P. 22–44.
85. Hogner E. Influence lines for the wave resistance of ships – I [Текст] / E. Hogner // Proc. R. Soc. Lond. – 1936. – Ser. A, Vol. 155. – P. 292–301.
86. Holtrop J., Mennen G.G.J. An approximate power prediction method [Текст] / J. Holtrop, G.G.J. Mennen // International Shipbuilding Progress. – 1982. – Vol. 29, No 335. – P.166–170.
87. Inui T. Wave-making resistance of ships [Текст] / T. Inui // Trans. SNAME. – 1962. – V. 70. – P. 283–326, disc. 326–352.
88. Janson C.E. Potential flow panel methods for the calculation of free surface flows with lift [Текст] : PhD-thesis / C.E. Janson. – Chalmers University of Technology, Göteborg, 1997. – 23 p.
89. Jensen G., Bertram V., Söding H. Ship wave-resistance computations [Текст] / G. Jensen, V. Bertram, H. Söding // Proc. 5-th Int. Conf. on Numer. Ship Hydrodyn. – Hiroshima, 1989. – P. 593–606.
90. Kim K.J. Ship flow calculations and resistance minimization [Текст] : PhD-thesis / K.J. Kim. – Chalmers University of Technology, Göteborg, 1989. – 18 p.
91. Lackenby H. On the systematic geometrical variation of ship forms [Текст] / H. Lackenby // RINA Transactions, 1950. – P. 289–316.
92. Larsson L., Stern F. and Bertram V. Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flow: the Gothenburg 2000 Workshop [Текст] / Larsson L., Stern F. and Bertram V. // J. Ship Res. – 2003. – Vol. 47. – P. 63–81.

93. Larsson L., Stern F. and Visonneau M. CFD in ship hydrodynamics – results of the Gothenburg 2010 workshop [Текст] / Larsson L., Stern F. and Visonneau M. // Proc. of the IV International Conference on Computational Methods in Marine Engineering – Barcelona (Spain): CIMNE, 2011. – P. 17–36.
94. Larsson L., Raven H.C. Ship Resistance and Flow [Текст] / L. Larsson, H.C. Raven. – Jersey City (USA): SNAME, 2010. – 230 p.
95. Ni S.Y. Higher order panel method for potential flows with linear or non-linear free surface boundary conditions [Текст] : PhD-thesis / S.-Y. Ni. – Chalmers University of Technology, Göteborg, 1987. – 13 p.
96. Pien P.C. The application of wavemaking resistance theory to the design of ship hull with low total resistance [Текст] / P.C. Pien // 5-th Symp. on Naval Hydrodynamics. – 1964. – P. 1109–1153.
97. Raven H.C. A practical nonlinear method for calculating ship wavemaking and wave resistance [Текст] / H.C. Raven // Proc. 19-th Symposium on Naval Hydrodyn. – Seoul, 1992. – P. 349–370.
98. Schneekluth H., Bertram V. Ship Design for Efficiency and Economy [Текст] / H. Schneekluth, V. Bertram. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. – 220 p.
99. Virtual Basin for Simulating Ship Sailing Qualities on HPC Resources [Текст] / A. Aksenov, A. Pechenyuk, A. Poyda et al. // Procedia Computer Science. – 2015. – Vol. 66. – P. 132–139.
100. Weinblum G. Anwendung der Michellschen Widerstandstheorie [Текст] / G. Weinblum // Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. – 1930. – S. 389.
101. Xia F. Numerical calculations of ship flows with special emphasis on the free-surface potential flow [Текст] : PhD-thesis / F. Xia. – Chalmers University of Technology, Göteborg, 1986. – 26 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ВЫДЕРЖКИ ИЗ ЛИЦЕНЗИОННЫХ СОГЛАШЕНИЙ НА ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В РАБОТЕ

ЛИЦЕНЗИОННОЕ СОГЛАШЕНИЕ		Топ Системы
Номер лицензии	Дата выдачи	
U-04/0805	12 августа 2005 г.	
Наименование продукта	Версия	
T-FLEX CAD 3D		9.x

Настоящий документ представляет собой Лицензионное соглашение между конечным пользователем (Заказчиком) и закрытым акционерным обществом «Топ Системы» («Топ Системы»). Передаваемое программное обеспечение и относящиеся к нему материалы, определенные в пункте ПРОГРАММА, лицензируются «Топ Системы» Заказчику на условиях настоящего соглашения.

Программа

Термин «Программа» будет означать собственность «Топ Системы» в виде передаваемой компьютерной программы или ее любой отдельный программный модуль. К термину «Программа» относятся:

- программное обеспечение,
- печатные материалы, подготовленные «Топ Системы» в связи с Программами, включая инструкции и руководства пользователя («Документацию»).

Передача лицензии

«Топ Системы» предоставляет Заказчику на условиях настоящего Лицензионного соглашения неисключительное, не подлежащее передаче право на использование передаваемой Программы с целью обработки лишь той информации, которая связана с собственной производственной деятельностью Заказчика. Настоящее Лицензионное соглашение разрешает Заказчику одновременное использование Программы одним пользователем на одном компьютере в одном месте. Однако, если Заказчик получил сетевую лицензию Программы, то разрешается использовать Программу в сети, при условии, что максимальное число одновременно работающих пользователей Программы не будет превышать количество приобретенных сетевых мест Программы.

Авторское право

«Топ Системы» владеет всеми правами, названиями на Программу. Заказчик признает права собственности «Топ Системы», а для T-FLEX CAD 3D/SE и фирмы EDS на Parasolid, а также коммерческие тайны, содержащиеся в Программе, и обязуется придерживаться разумной осторожности для сохранения их конфиденциальности. Заказчик должен рассматривать Программу как любой другой защищенный законом об охране интеллектуальной собственности материал (например, книгу или музыкальную запись), за исключением того, что он может сделать одну копию Программы в целях создания резервной копии. Запрещается копировать печатные материалы, сопровождающие Программу.

Другие ограничения

Запрещается восстанавливать исходный код Программы, дисассемблировать и декомпилировать Программу на составные части и создавать на их основе производные продукты. Запрещается передавать Программу в пользование гражданам и постоянно проживающим стран, подпадающих под экспортные ограничения России, США (для T-FLEX CAD 3D/SE) и Великобритании (для T-FLEX CAD 3D/SE). Запрещается распространять, сдавать в аренду, предоставлять займы, продавать Программу как полностью, так и по частям или передавать права на лицензию без письменного разрешения «Топ Системы». Запрещается удалять, изменять или каким-либо образом скрывать имеющиеся в Программе уведомления о праве собственности, ярлыки и маркировку.

Запрещены любые действия по снятию защиты от копирования Программы.

При нарушении условий Лицензионного соглашения «Топ Системы» имеют право на его расторжение.

С расторжением лицензии Заказчик должен прекратить использование Программы, уничтожить Программу и все резервные копии Программы и вернуть «Топ Системы» программные носители, Документацию и другие материалы, передаваемые «Топ Системы» Заказчику по условиям Лицензионного соглашения. Заказчик не должен публиковать результаты тестирования Программы.

Общее положение

Настоящее соглашение регулируется законами Российской Федерации. Настоящее Лицензионное соглашение представляет собой полный объем договоренностей, достигнутый между «Топ Системы» и Заказчиком, и заменяет собой все прочие соглашения и рекламные материалы в отношении Программы.

Гарантии

«Топ Системы» гарантирует Заказчику, что (1) Программа, если она не изменена пользователем, будет выполнять функции, в целом описываемые в документации, поставляемой «Топ Системы», в случае ее использования на аппаратуре и в операционной системе, для которых она была разработана «Топ Системы». (2) Электронные носители, на которых поставляется Программа, а также все прилагаемые к Программе аппаратные ключи или другие устройства защиты от копирования будут в условиях нормальной эксплуатации свободны от дефектов. В соответствии с настоящими гарантиями «Топ Системы» в течение одного года с даты передачи программы предпримет в течение технически обоснованного периода времени меры для устранения заявленной «Программной ошибки» (неспособность программы выполнить функции, описанные в документации) и бесплатной замены электронного носителя, имеющего дефекты. Для заявки претензии Заказчик должен, оплатив почтовые расходы, вернуть «Топ Системы» в течение гарантийного периода дефектное изделие с подтверждением о покупке. ПЕРЕЧИСЛЕННЫЕ ГАРАНТИИ НОСЯТ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР и ВЫСТУПАЮТ ВМЕСТО ВСЕХ ДРУГИХ ГАРАНТИЙ, ОГОВОРЕННЫХ ЯВНО ИЛИ ПОДРАЗУМЕВАЕМЫХ, ВКЛЮЧАЯ ПОДРАЗУМЕВАЕМЫЕ ГАРАНТИИ КОММЕРЧЕСКОГО УСПЕХА И ПРИГОДНОСТИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПРЕДЕЛЕННОЙ ЗАДАЧИ. НИКАКАЯ УСТНАЯ ИЛИ ПИСЬМЕННАЯ ИНФОРМАЦИЯ, ИСХОДЯЩАЯ ОТ «Топ Системы» ИЛИ ЕГО СОТРУДНИКОВ, НЕ ПОВЫСИТ ПРЕДЕЛЫ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ПО ПЕРЕЧИСЛЕННЫМ ГАРАНТИЯМ И НЕ СОЗДАСТ НОВЫЕ ГАРАНТИИ.

Ограничение ответственности

«Топ Системы» НЕ ОТВЕЧАЕТ ПЕРЕД ЗАКАЗЧИКОМ ЗА ЛЮБЫЕ КОСВЕННЫЕ, СЛУЧАЙНЫЕ ИЛИ ОСОБЫЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ, ВКЛЮЧАЯ ПОТЕРЮ ОЖИДАЕМОЙ ПРИБЫЛИ, ДОХОДОВ, ДАННЫХ И Т.Д., СТАВШИЕ РЕЗУЛЬТАТОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЛИ НЕВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММЫ, ДАЖЕ ЕСЛИ «Топ Системы» ПОСТАВЛЕН В ИЗВЕСТНОСТЬ, ЧТО ОН МОЖЕТ БЫТЬ ПРИЧИНОЙ ЭТИХ ПОСЛЕДСТВИЙ.

«Топ Системы» НЕ ГАРАНТИРУЕТ, ЧТО ПОСТАВЛЯЕМЫЕ ПРОГРАММЫ БУДУТ РАБОТАТЬ ПРАВИЛЬНО НА ЛЮБОЙ АППАРАТУРЕ ИЛИ, ДЕЙСТВОВАТЬ В КОМБИНАЦИИ С ДРУГИМИ ПРОГРАММАМИ, ПРЕДЛАГАЕМОЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ ИЛИ, ЧТО РАБОТА ПРОГРАММ БУДЕТ НЕПРЕРЫВНОЙ И БЕЗОШИБОЧНОЙ ИЛИ, ЧТО ВСЕ ОШИБКИ ПРОГРАММ МОГУТ БЫТЬ ИСПРАВЛЕНЫ.

«Топ Системы» НЕ НЕСЕТ КАКОЙ-ЛИБО ОТВЕТСТВЕННОСТИ ЗА УТРАТУ ИЛИ ХИЩЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЛИ КАКОГО-ЛИБО УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ КОПИРОВАНИЯ, ВХОДЯЩЕГО В СОСТАВ ПОСТАВЛЕННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ. В ЧАСТНОСТИ, «Топ Системы» НЕ ОБЯЗАН ЗАМЕНЯТЬ КАКИЕ-ЛИБО УТРАЧЕННЫЕ ИЛИ ПОХИЩЕННЫЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЛИ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ КОПИРОВАНИЯ. ЗАКАЗЧИК ЕДИНОЛИЧНО НЕСЕТ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ УТРАТЫ ИЛИ ХИЩЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ЛЮБЫХ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ОТ КОПИРОВАНИЯ И ЗА ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАННОСТИ СВОИХ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЙ ПОСРЕДСТВОМ СТРАХОВАНИЯ И ИНЫМИ СПОСОБАМИ.

ОТВЕТСТВЕННОСТЬ «Топ Системы» ВО ВСЕХ СЛУЧАЯХ НЕ МОЖЕТ ПРЕВЫШАТЬ СУММУ, ПОЛУЧЕННУЮ «Топ Системы» ОТ ЗАКАЗЧИКА.

Настоящее лицензионное соглашение вступает в силу с момента передачи Программы Заказчику.

Спецификация программного продукта

Программный комплекс FlowVision, включая CD с программным комплексом и документацией, электронные ключи, 3 бессрочных промышленных лицензии, техническая поддержка до 19.09.2006г.

Программный комплекс FlowVision поставляется в следующем составе:

Одна лицензия:

- Ядро FlowVision (включая пре- и постпроцессор);
- TurbulentKE (модель несжимаемого турбулентного течения жидкости);
- Free Surface (модель турбулентного двухфазного течения среды);
- Sliding Mesh (моделирование вращающихся тел);
- Moving bodies (подвижные тела)

Две лицензии:

- Ядро FlowVision (включая пре- и постпроцессор);
- Free Surface (модель турбулентного двухфазного течения среды);
- Moving bodies (подвижные тела)

От ООО «ТЕСИС»
Генеральный директор



Курсаков С.Н.

От «Digital Marine Technology»
Директор



Тимохин К.Б.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

СВЕДЕНИЯ ОБ УЧАСТНИКАХ СЕМИНАРА «ГЁТЕБОРГ-2010»

Таблица Б.1

Организация	Название ПК	Модели турбулентности	Пристен. функции	Модель свобод. поверхности	Тип дискретизации	Порядок дискретизации	Тип сетки	Скорость - давление
CD-Adapco	STAR-CCM+	Standard k-ε	N	VOF	FV	2	U	PR
CEHINAV TU Madrid	STAR-CCM+	k-ω, SST	N	VOF	FV	1	MU	PR SIMPLE
Chalmers	SHIPFLOW4.3	k-ω, SST, EASM	N	-	FV	2	S	A
CSSRC	FLUENT 6.3	k-ω, SST, RNG k-ε	N	VOF	FV	2	MS	PR SIMPLE
CTO	STAR-CCM+	k-ε	N, WO	VOF	FV	2	U	PR SIMPLE
ECN/CNRS	ISIS CFD	k-ω, EASM	WO	VOF	FV	2	U	PR SIMPLE
ECN/HOE	ICARE	Уилкоккс k-ω, k- ω, SST	N, WO	Нелин. отслеж.	FD	2	S	DM
FLOWTECH	SHIPFLOW-VOF- 4.3	k-ω, SST	N	VOF	FV	2	MS	A
FOI	OF	LES	WO	VOF	FV	2	U	PR SIMPLE
FORCE	CFDShip-Iowa	k-ω, SST	N	Ф-ция уровня	FD	2	OS	PR PISO
GL&UDE Univ. Duisburg	Comet OpenFOAM	k-ε	N, WO	VOF	FV	Смеш.	U	PR SIMPLE
HSVA	FreSCo+	2E, k-ε	N	VOF	FV	3	U	PR
IHI/Univ. Tokyo	WISDAM-UTokyo	Болдуин- Ломакс и DSGS	N	Функция плотности ρ	FV	3	OS	PR MAC
IIHR	CFDShip-Iowa V4, V4.5, V6	DES на основе гибридн. k-ε/k- ω, DES на основе гибридн. ARS	WO, N	Ф-ция уровня	FD	2-4	S, OS	PR, дробн. шаг
IIHR-SJTU	FLUENT12.0.16	Реализ. k-ε	N, W	VOF	FV	3	MS	PR

Обозначения: A – искусственная сжимаемость, DM – прямой метод, FD – конечно-разностный, FV – конечно-объемный, MS – мультиблочная структурированная, MU – мультиблочная неструктурированная, N – прилипание на стенке, OS – перекрывающаяся структура, PR – корректировка давления, S – одноблочная структурированная, U – неструктурированная, W/WO – пристенные функции с/без учета градиента давления

ПРИЛОЖЕНИЕ В **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЧЕРТЕЖИ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ**

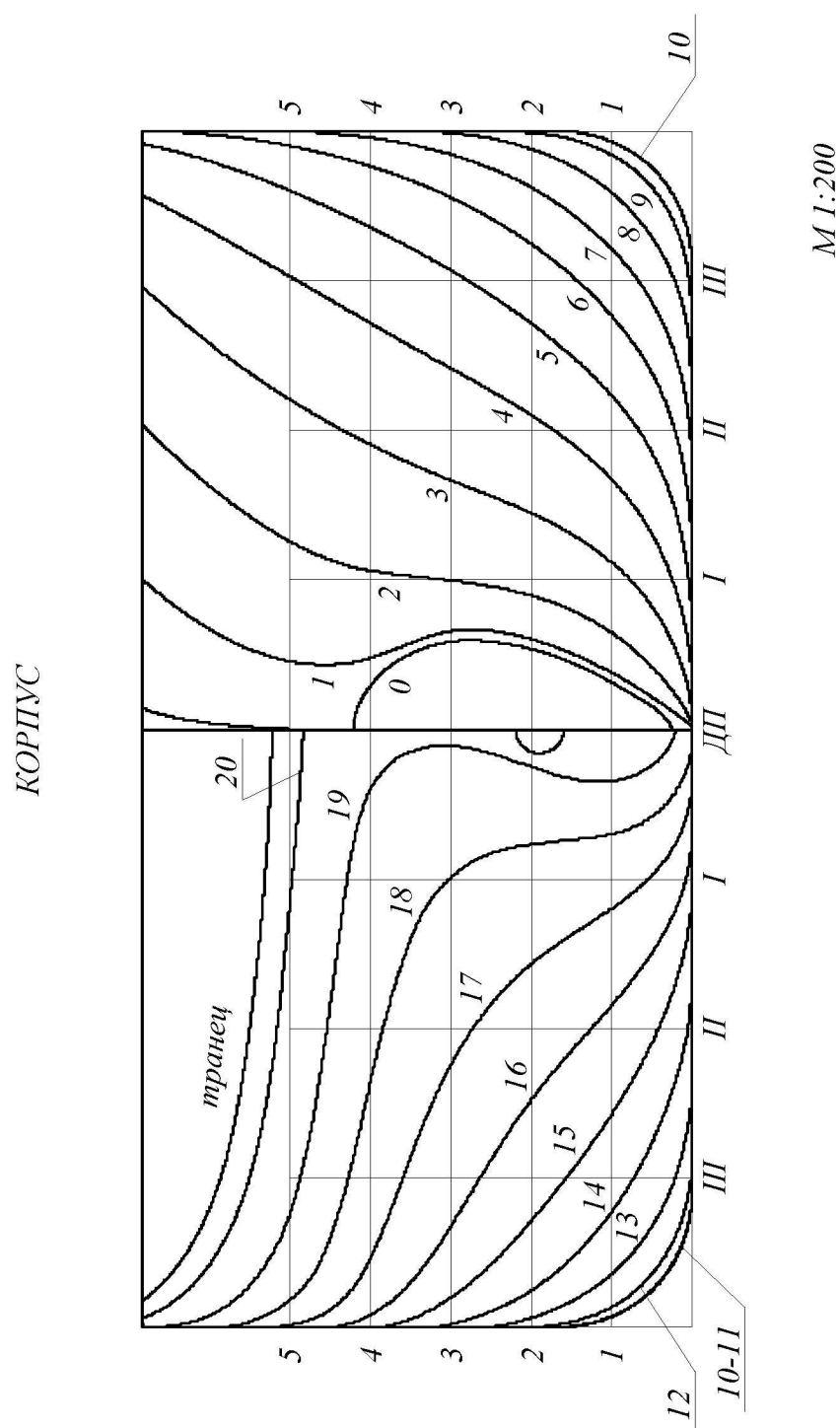


Рисунок В.1 – Судно КС – корпус

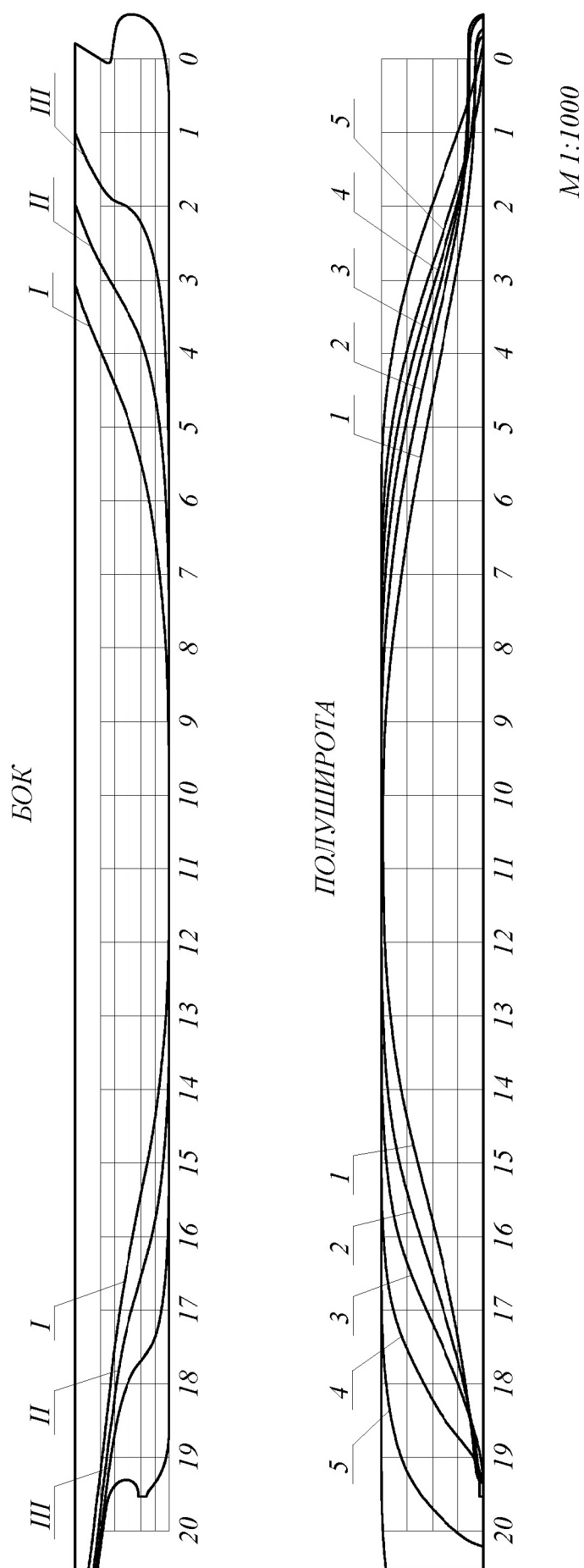


Рисунок В.2 – Судно KCS – бок и полуширота

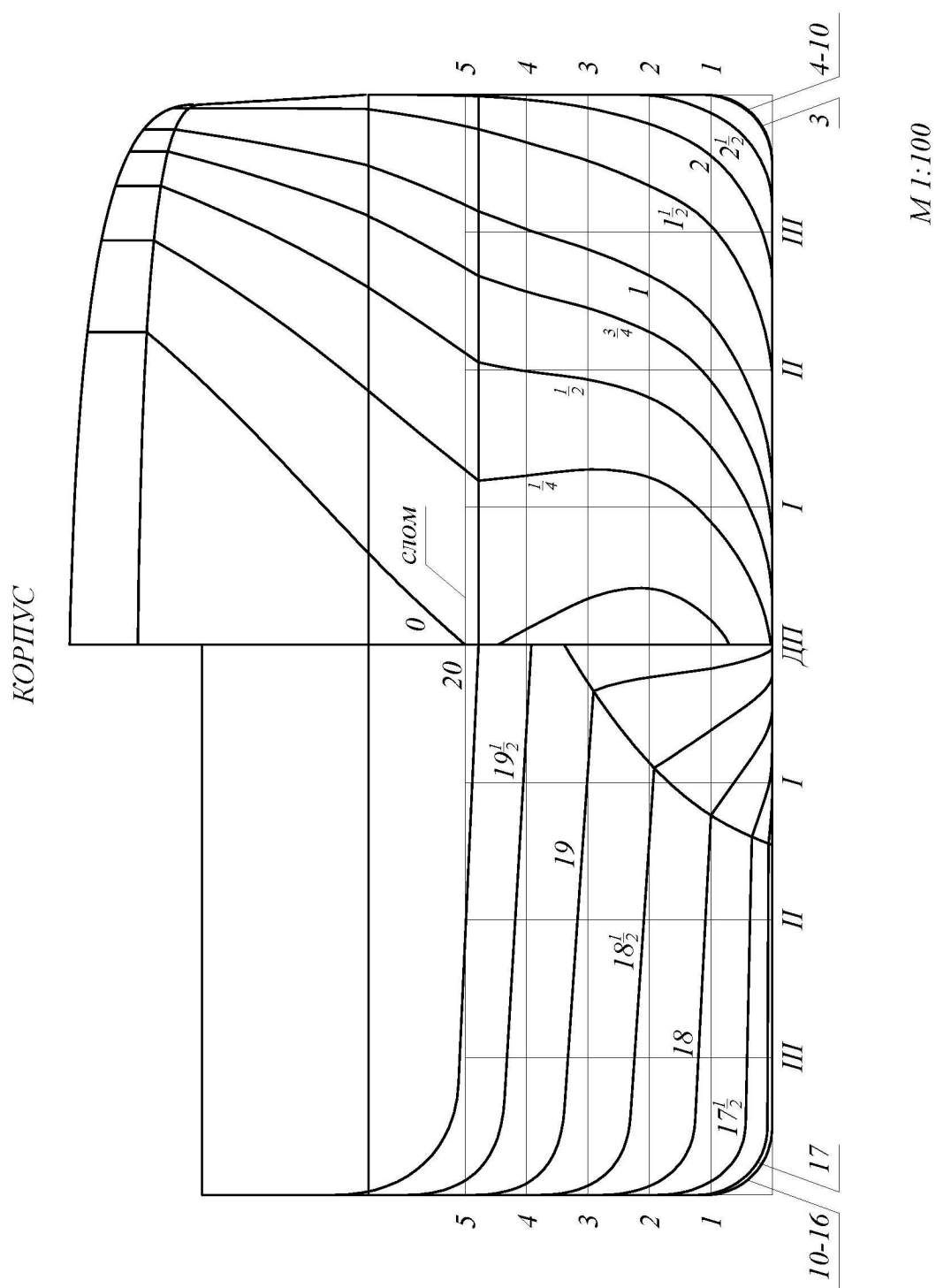


Рисунок В.3 – ССП, исходные обводы в численном исследовании – корпус

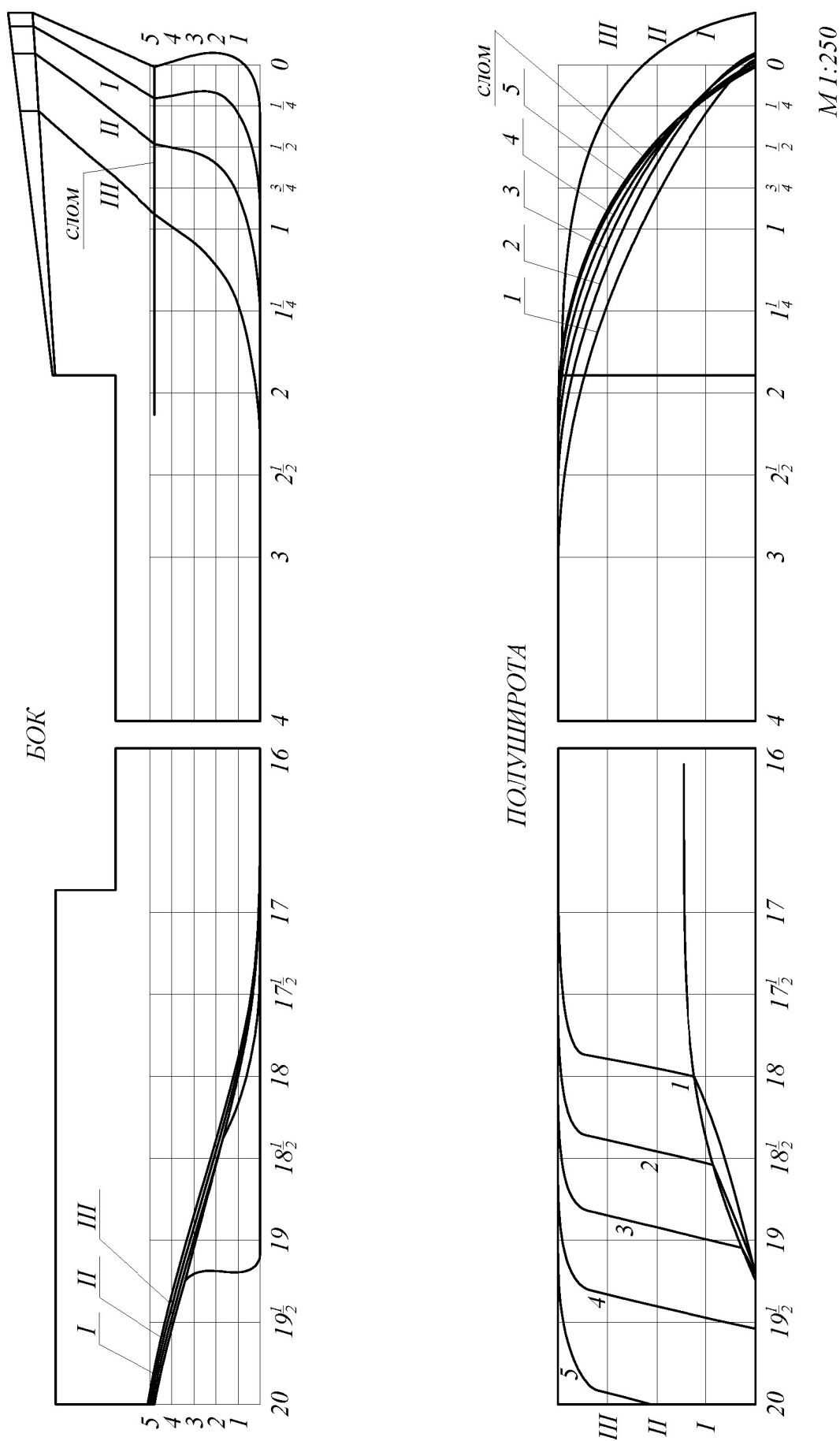


Рисунок В.4 – ССП, исходные обводы в численном исследовании – бок и полуширота

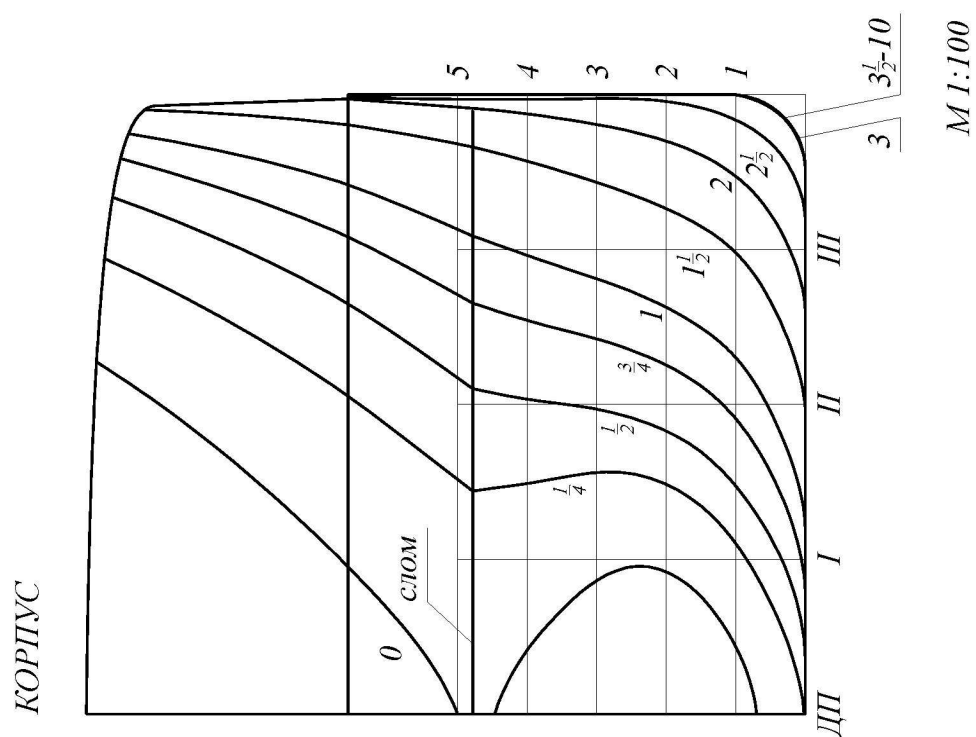


Рисунок В.5 – ССП, носовая часть с усовершенствованными обводами в численном и экспериментальном (модель 2) исследованиях – корпус

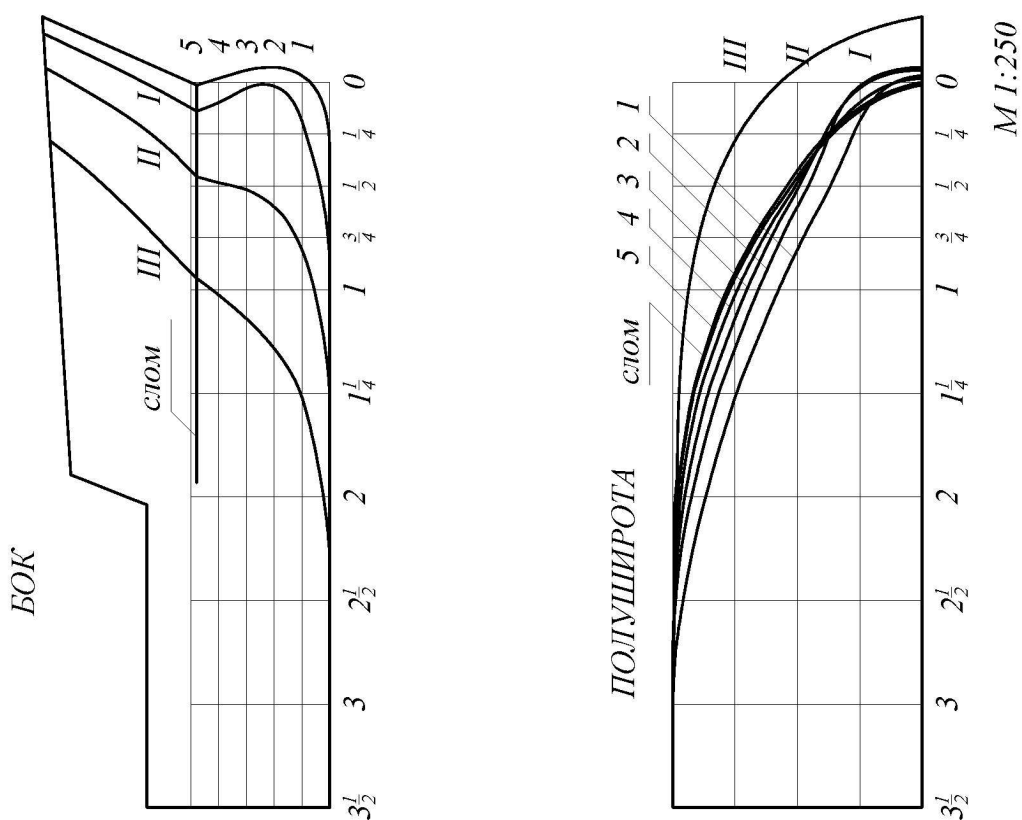


Рисунок В.6 – ССП, носовая часть с усовершенствованными обводами в численном и экспериментальном (модель 2) исследованиях – бок и полуширота

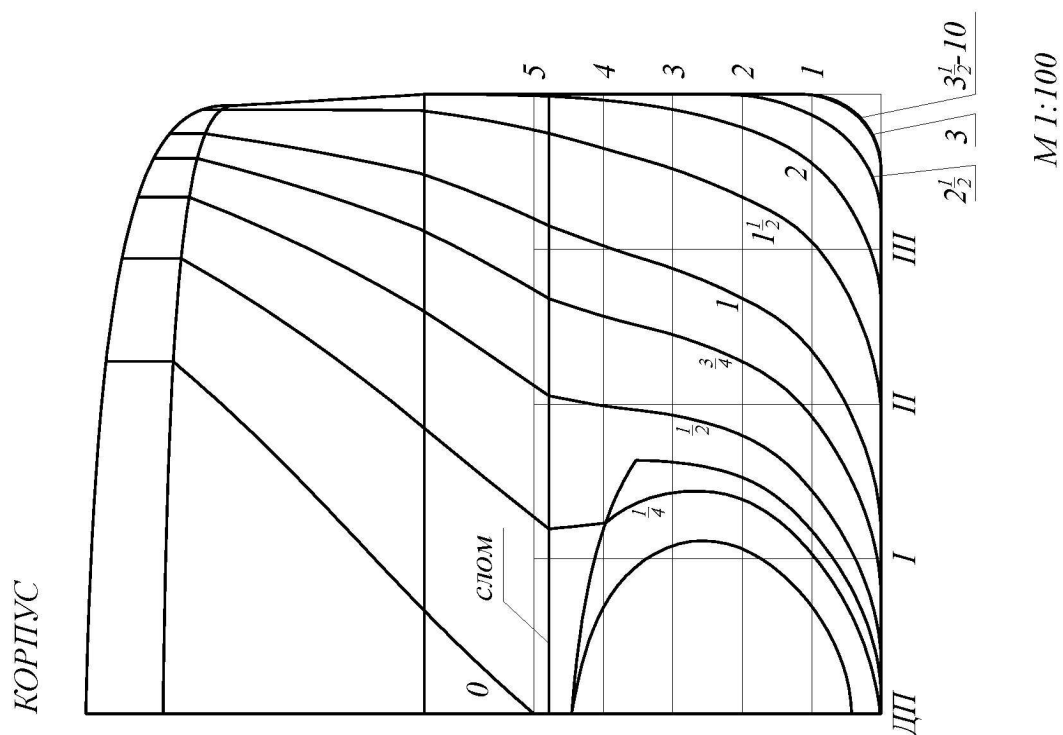


Рисунок В.7 – ССП, носовая часть с бульбовой наделкой в численном исследовании – корпус

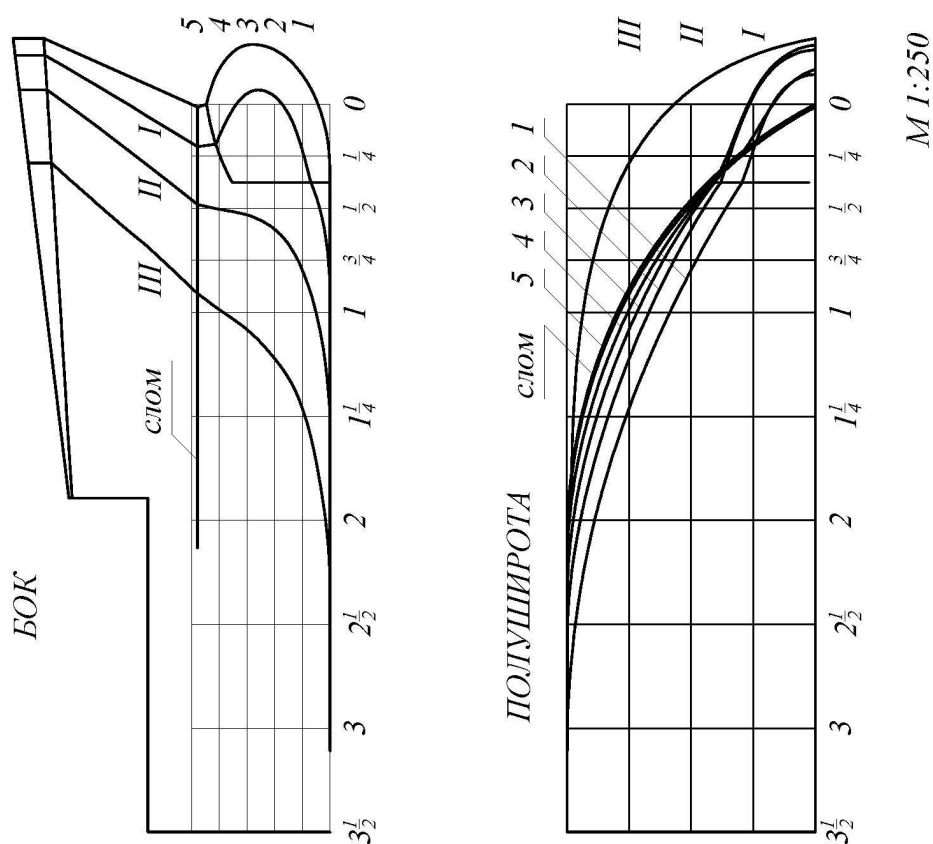


Рисунок В.8 – ССП, носовая часть с бульбовой наделкой в численном исследовании – бок и полуширота

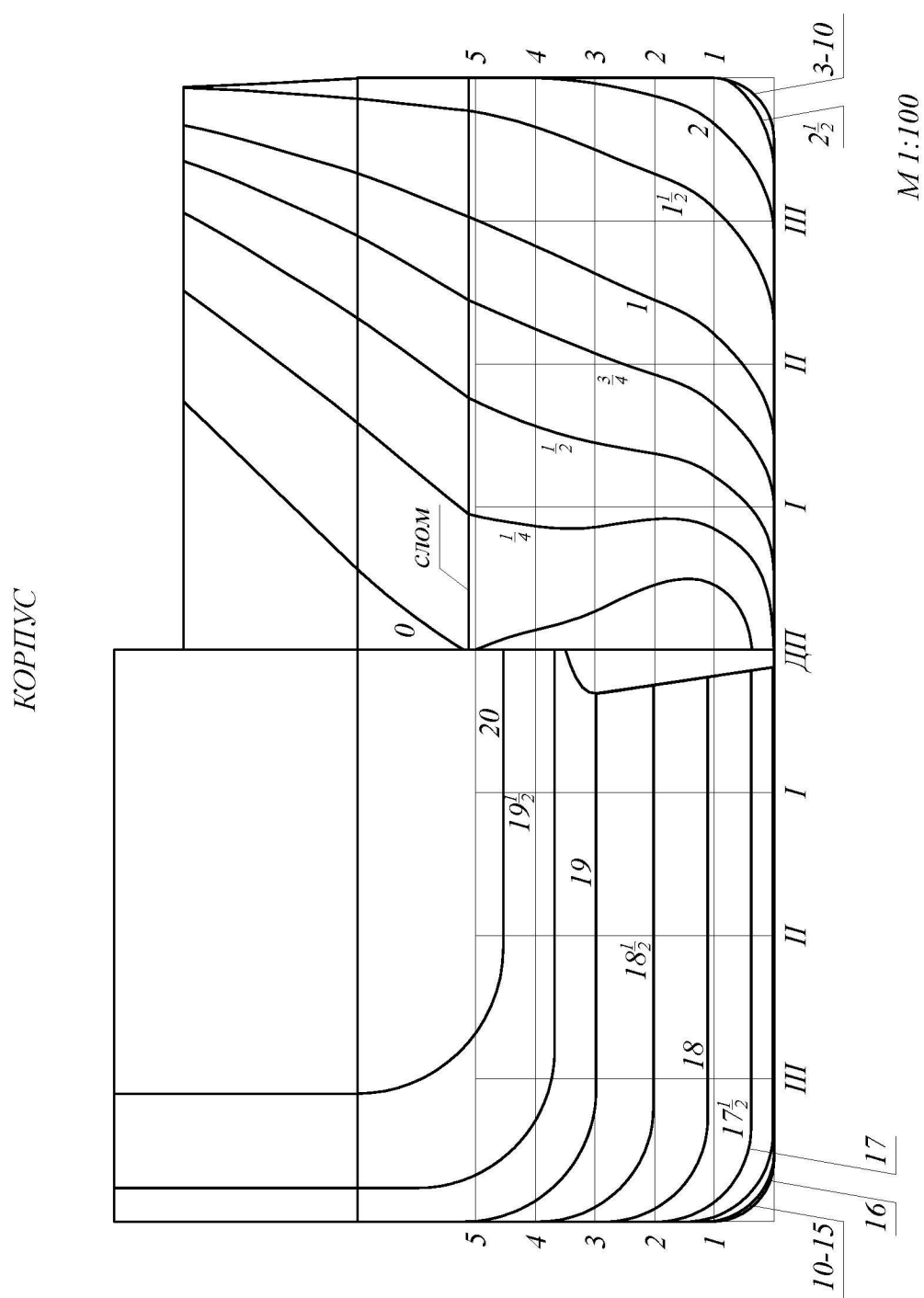


Рисунок В.9 – ССП, исходные обводы в экспериментальном исследовании
(модель 1) – корпус

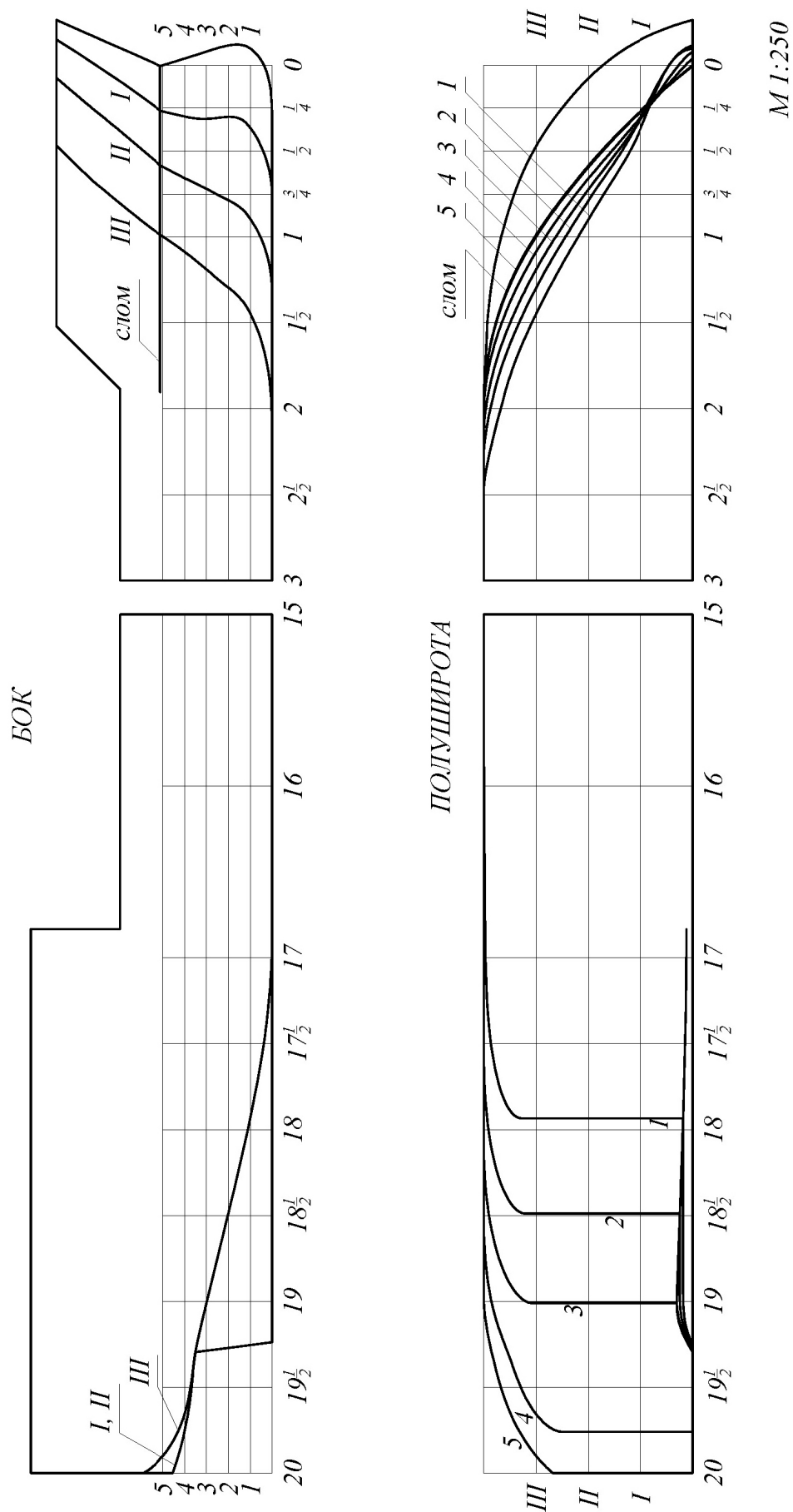


Рисунок В.10 – ССП, исходные обводы в экспериментальном исследовании
(модель 1) – бок и полуширота

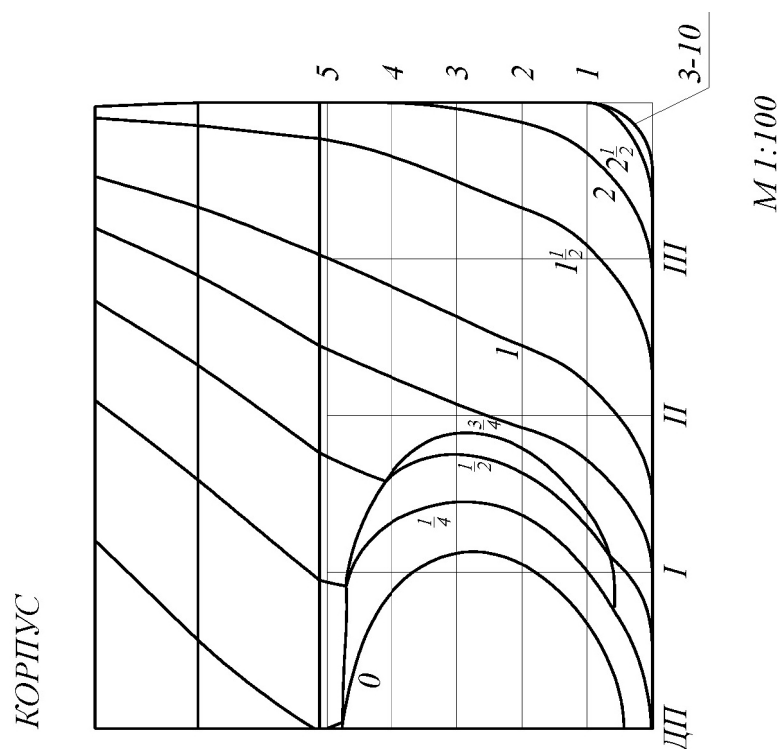


Рисунок В.11 – ССП, носовая часть с бульбовой наделкой в экспериментальном исследовании (модель 3) – корпус

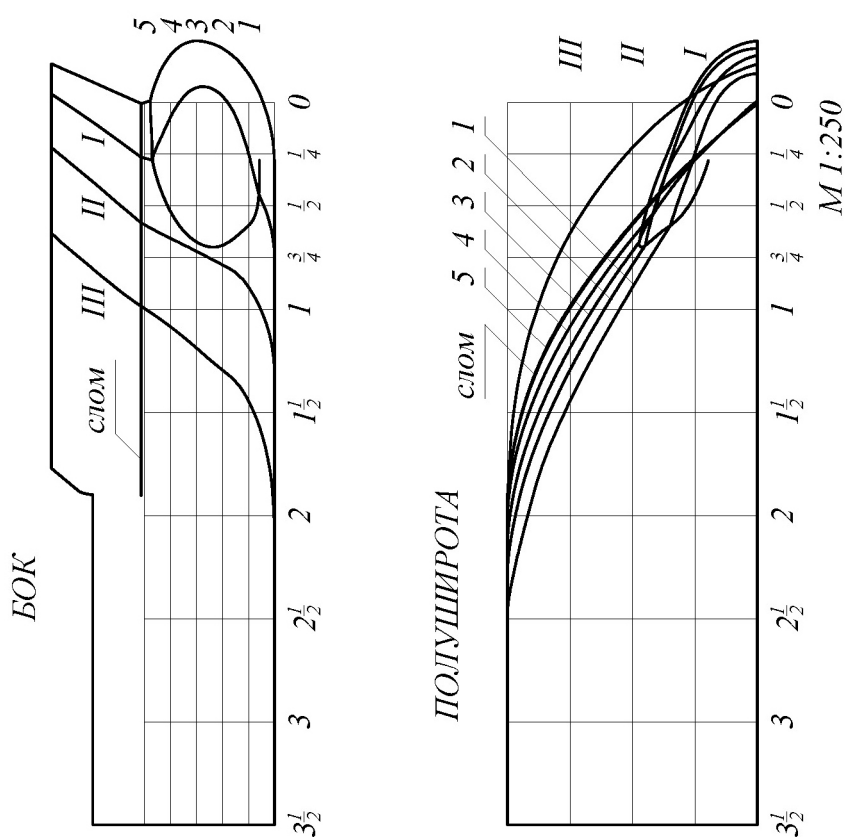


Рисунок В.12 – ССП, носовая часть с бульбовой наделкой в экспериментальном исследовании (модель 3) – бок и полуширота

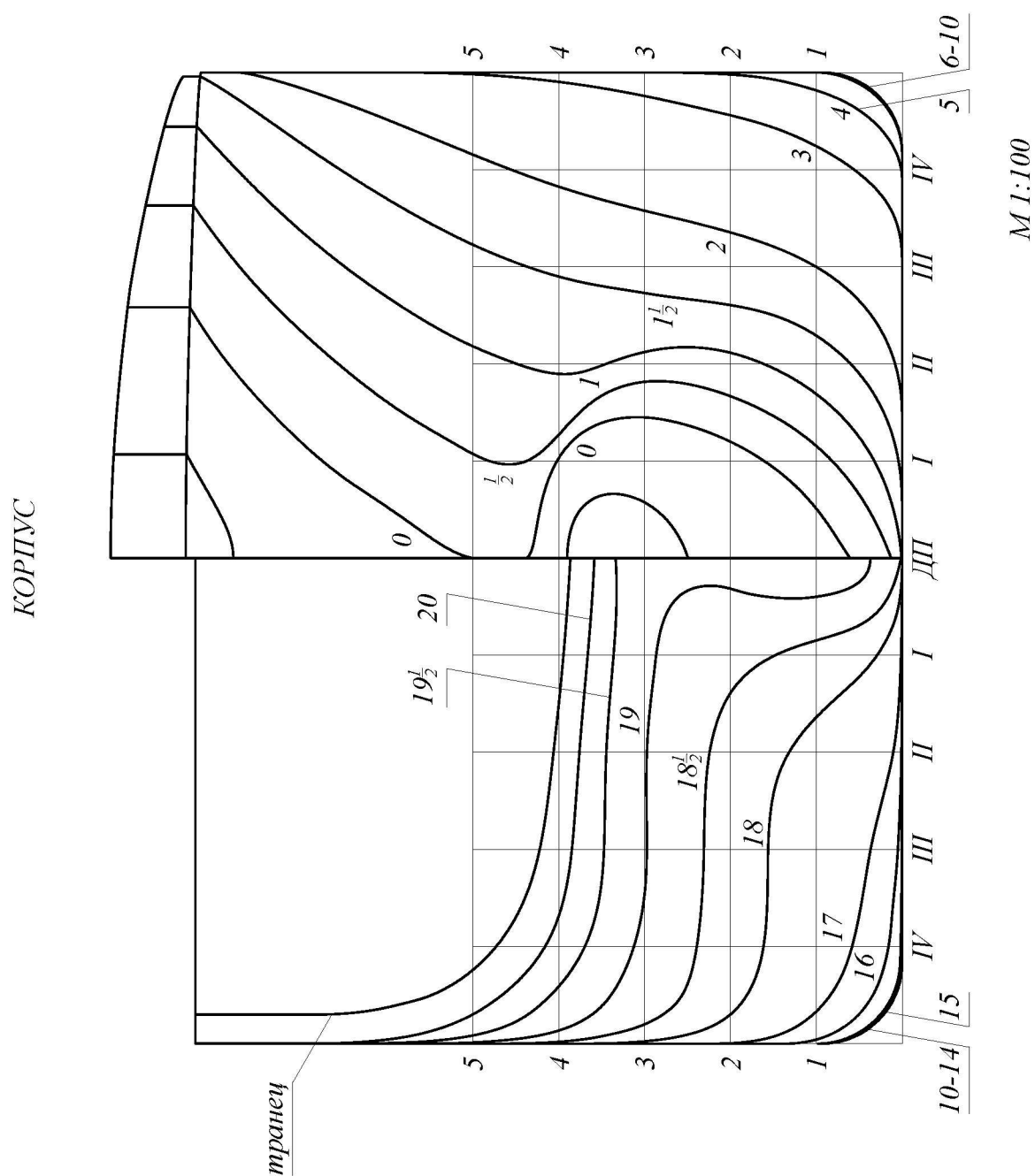


Рисунок В.13 – МСС, объект исследования масштабного эффекта при отрыве ПС - корпус

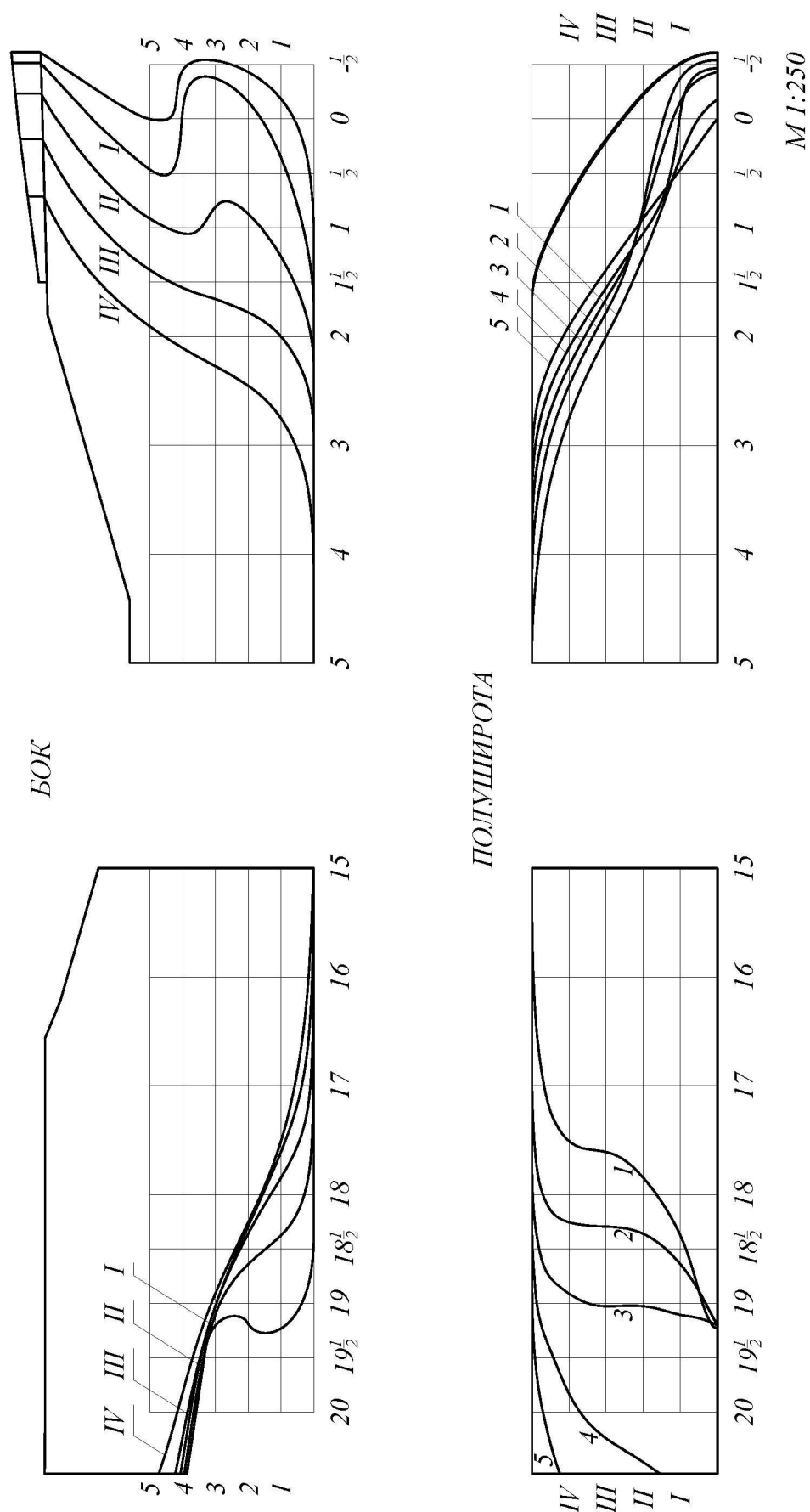


Рисунок В.14 – МСС – объект исследования масштабного эффекта при отрыве ПС
– бок и полуширота

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

ИНФОРМАЦИЯ О СРАВНЕНИИ ДАННЫХ ЧИСЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ССП типа “Iran Anzali” (проект МИБ RSD19). Главные размерения (таблица Д.1) и форма корпуса весьма близки к ССП – объекту численных исследований настоящей работы (см. пункт 2.3.2; рис. В.3 и рис. В.4 в Приложении В). Обводы носовой части полностью совпадают с приведенными на рис. В.3 и рис. В.4. Кормовые обводы, в отличие от объекта диссертационной работы, были спроектированы под двухвальный винто-рулевой комплекс и имеют неглубокие полутуннели.

Численное исследование выполнено по представленной в подразделе 2.2 методике. Модельные испытания проводились в КГНЦ. Сравнение расчетных и экспериментальных данных в виде коэффициентов остаточного и полного сопротивления судна представлено на рис. Д.1. Как видно из рисунка, расчетные и экспериментальные результаты весьма удовлетворительно соответствуют друг другу. Информация о проектировании формы корпуса ССП типа “Iran Anzali” и выполненных численных и экспериментальных исследованиях опубликована в статье [4].

Таблица Д.1 – Главные размерения ССП типа “Iran Anzali”

Характеристики объекта	Натура	Модель (М1:16.1)
Длина по ватерлинии L_{WL} , м	137.8	8.5431
Ширина B , м	16.5	1.0229
Высота борта D , м	6.0	0.3720
Осадка T , м	4.6	0.2852
Водоизмещение объемное ∇ , м ³	9428.8	2.2467
Площадь смоченной поверхности S , м ²	3271.6	12.5745
Коэффициент общей полноты C_B	0.902	
Относительная абсцисса ЦВ L_{CB} (%), в нос «+»	+0.72	

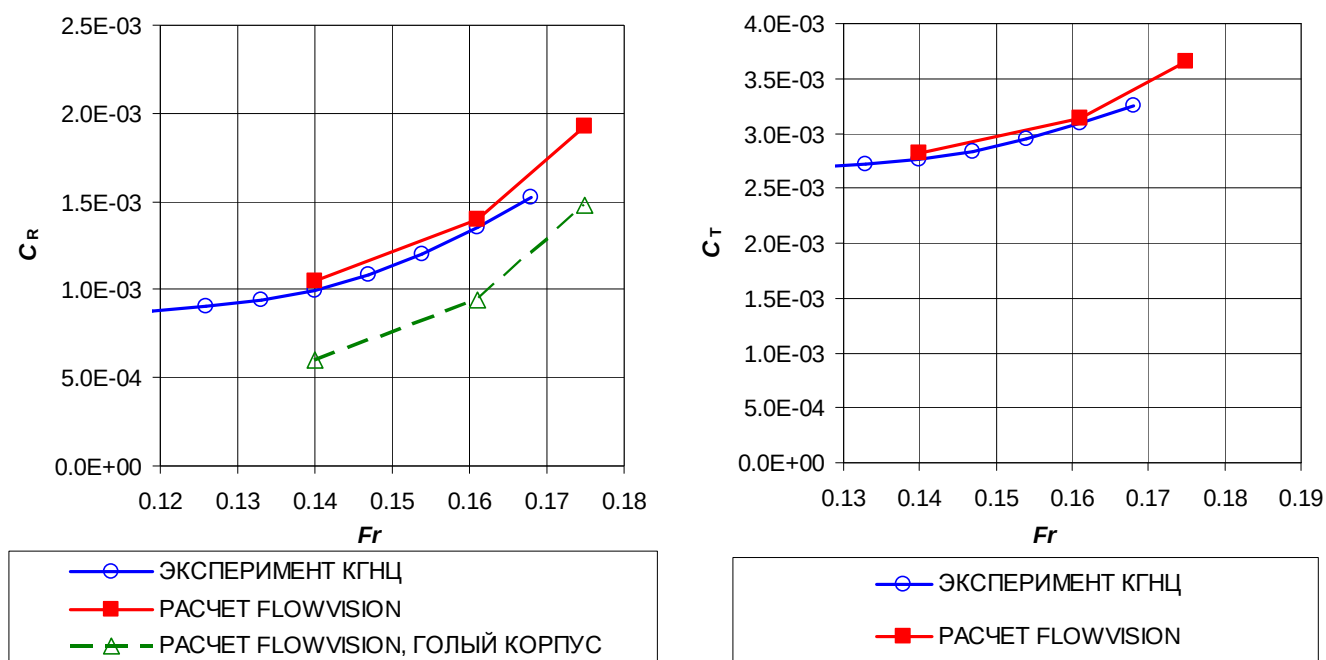


Рисунок Д.1 – Кривые коэффициентов сопротивления, ССП типа “Iran Anzali”

ССП типа «ВФ Танкер» (проект МИБ RST27). Обводы корпуса имеют экстремальный коэффициент общей полноты 0.93. Фотография судна в доке представлена на рис. 5.12. Носовые обводы таранно-конические, кормовые обводы санного типа с транцем и неглубокими полутуннелями для размещения винто-рулевых колонок. Главные размерения представлены в таблице Д.2.

Численное исследование выполнялось в 2010 г. при проектировании формы корпуса. Модельные испытания проводились в КГНЦ. Сравнение расчетных и экспериментальных данных в виде коэффициентов остаточного и полного сопротивления судна представлено на рис. Д.2.

Из рис. Д.2 видно, что экспериментальные значения коэффициента остаточного сопротивления лучше совпадают с соответствующими расчетными значениями для голого корпуса, в то время как значения коэффициентов полного сопротивления судна весьма удовлетворительно соответствуют друг другу. Дело в том, что в численном исследовании в величине коэффициента остаточного сопротивления было учтено сопротивление выступающих частей. При обработке же результатов эксперимента коэффициент остаточного сопротивления был рассчитан для голого корпуса, а все надбавки включены непосредственно в величину коэффициента полного сопротивления. В [25] было выполнено

сравнение численных и экспериментальных данных без учета указанной информации. Тем не менее, поскольку влияние выступающих частей в данном случае невелико, в [25] была отмечена весьма удовлетворительная согласованность численных и экспериментальных результатов. Информация о численном исследовании ССП типа «ВФ Танкер» опубликована в статье [10].

Таблица Д.2 – Главные размерения ССП типа «ВФ Танкер»

Характеристики объекта	Натура	Модель (М1:16)
Длина по ватерлинии L_{WL} , м	140.7	8.7938
Ширина B , м	16.6	1.0375
Высота борта D , м	6.0	0.3750
Осадка T , м	3.6	0.2250
Водоизмещение объемное ∇ , м ³	7815.0	1.9080
Площадь смоченной поверхности S , м ²	3245.3	12.6770
Коэффициент общей полноты C_B	0.930	
Относительная абсцисса ЦВ L_{CB} (%), в нос «+»	+1.01	

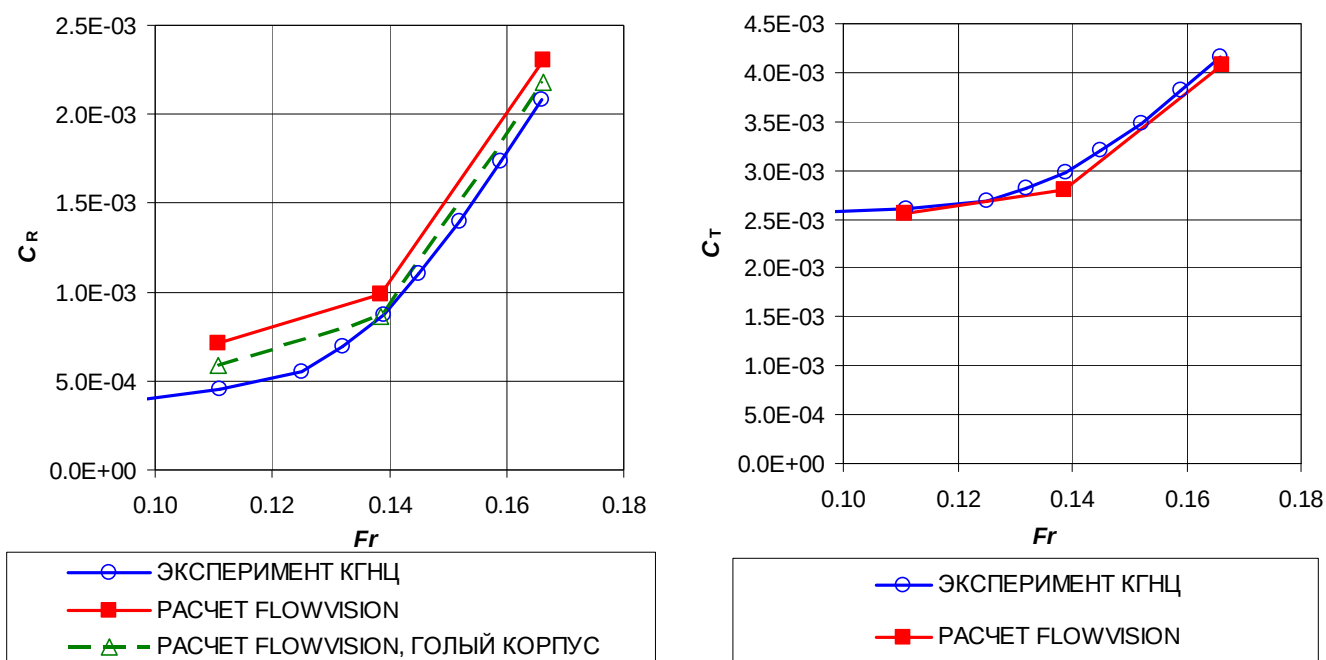


Рисунок Д.2 – Кривые коэффициентов сопротивления, ССП типа «ВФ Танкер»

ССП «Св. Константин» (проект 00352 КБ «Вымпел»). Форма корпуса спроектирована в КБ «Вымпел». Носовые обводы с наклонным форштевнем;

кормовая оконечность транцевая, с центральным обтекателем под одновальную пропульсивную установку. Главные размерения представлены в таблице Д.3.

Модельные испытания выполнялись при проектировании судна в опытовом бассейне КБ «Вымпел». Численное исследование выполнялось в 2006 г. Сравнение расчетных и экспериментальных данных в виде коэффициентов остаточного и полного сопротивления судна представлено на рис. Д.3.

Коэффициенты остаточного сопротивления голого корпуса отличаются на $(0.3 \div 0.5) \cdot 10^{-3}$, расчетные значения меньше экспериментальных. Значения коэффициентов полного сопротивления судна практически совпадают. Это объясняется разными величинами надбавок, включенных в коэффициент полного сопротивления. Основную роль в расхождениях сыграла надбавка на выступающие части, к которым относится, в том числе, трехперьевая система рулей Енкеля. При обработке результатов эксперимента была принята эмпирическая надбавка $0.35 \cdot 10^{-3}$. По результатам численного моделирования обтекания корпуса с выступающими частями соответствующая надбавка составила около $0.64 \cdot 10^{-3}$.

Таблица Д.3 – Главные размерения ССП «Св. Константин»

Характеристики объекта	Натура	Модель (М1:36)
Длина по ватерлинии L_{WL} , м	99.9	2.7750
Ширина B , м	16.5	0.4583
Высота борта D , м	6.0	0.3750
Осадка T , м	4.5	0.1667
Водоизмещение объёмное ∇ , м ³	6389.0	0.1369
Площадь смоченной поверхности S , м ²	2248.0	1.7346
Коэффициент общей полноты C_B	0.861	
Относительная абсцисса ЦВ L_{CB} (%), в нос «+»	+0.27	

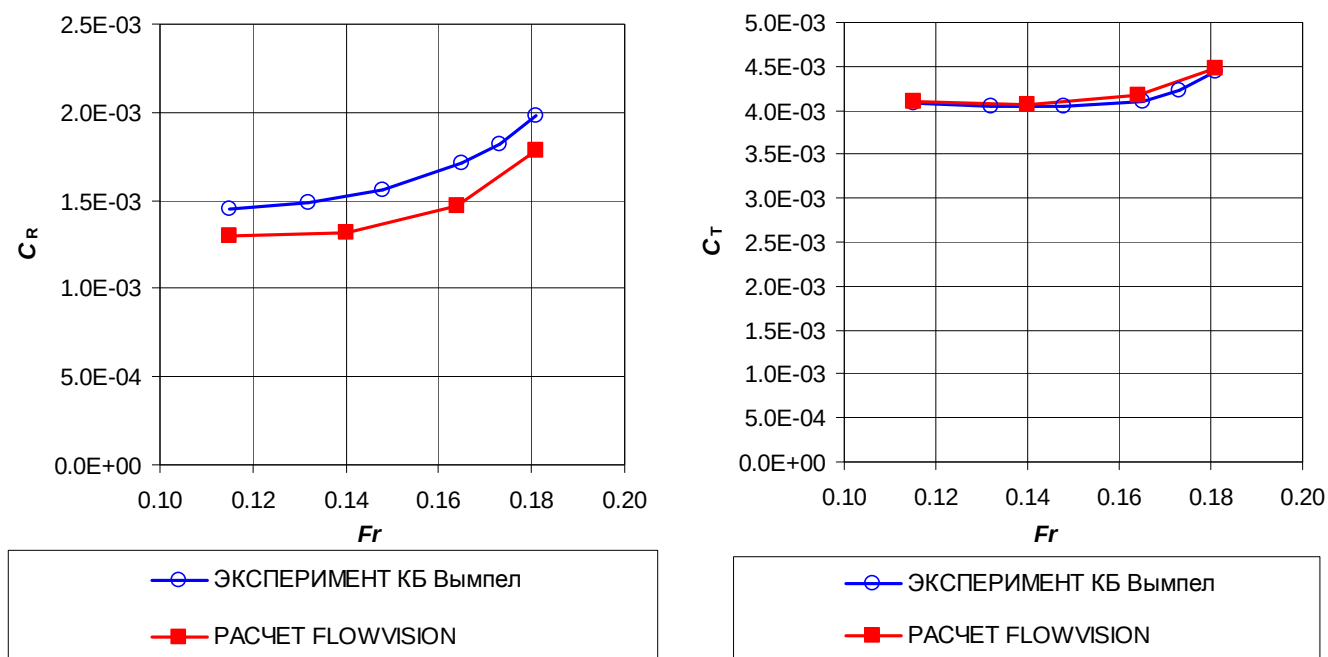


Рисунок Д.3 – Кривые коэффициентов сопротивления, ССП «Св. Константин»

Патрульный катер. Форма корпуса спроектирована государственным предприятием «Исследовательско-Проектный Центр Кораблестроения». Носовая оконечность выполнена с наклонным форштевнем, кормовая оконечность транцевая. Главные размерения представлены в таблице Д.4.

Таблица Д.4 – Главные размерения патрульного катера

Характеристики объекта	Натура	Модель (М1:10.4)
Длина по ватерлинии L_{WL} , м	52.00	5.0000
Ширина B , м	8.07	0.7760
Осадка T , м	2.45	0.2356
Водоизмещение объёмное ∇ , м ³	366.4	0.3257
Площадь смоченной поверхности S , м ²	413.6	3.8240
Коэффициент общей полноты C_B	0.356	
Относительная абсцисса ЦВ L_{CB} (%), в нос «+»	-9.01	

Модельные испытания проводились при проектировании судна в гидролотке Проектно-исследовательского центра кораблестроения, СТО S.A. (г. Гданськ, Польша). Численное исследование выполнялось в 2007 г. с целью поиска путей оптимизации формы корпуса. Сравнение расчетных и

экспериментальных данных в виде коэффициентов остаточного и полного сопротивления судна представлено на рис. Д.4. Расчетные и экспериментальные результаты весьма удовлетворительно соответствуют друг другу.

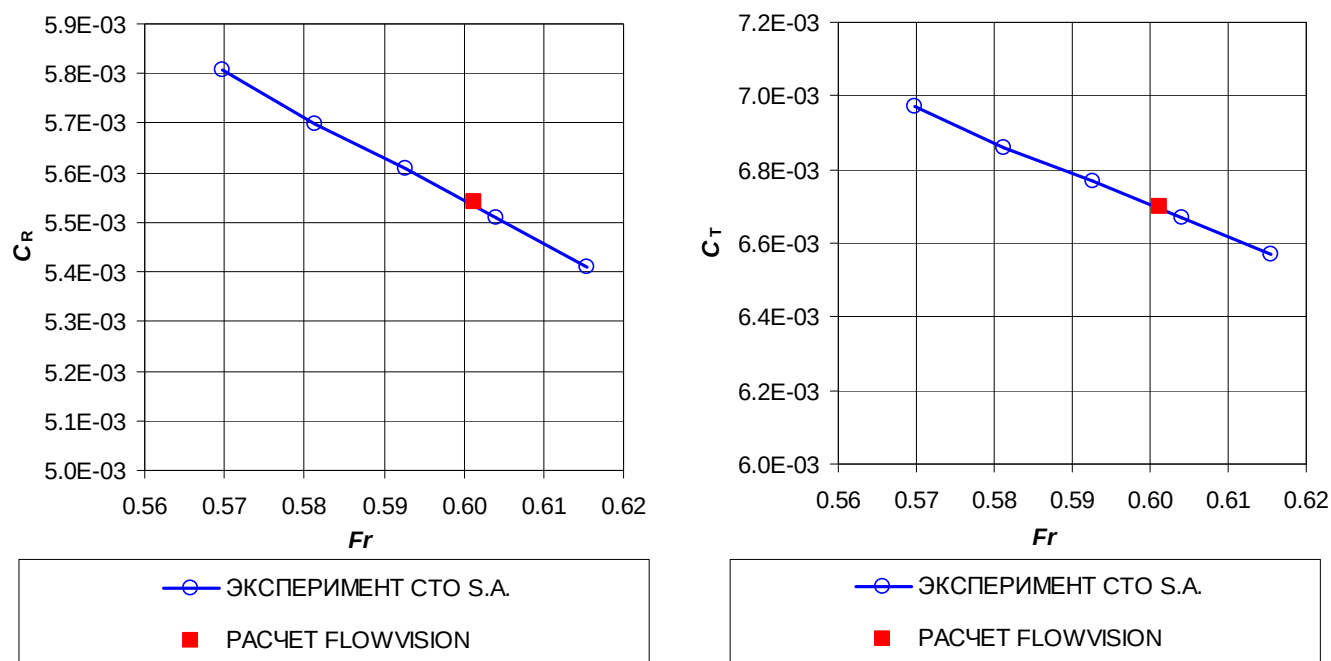


Рисунок Д.4 – Кривые коэффициентов сопротивления, патрульный катер

Многофункциональное аварийно-спасательное судно ледового плавания мощностью 4 МВт типа «Спасатель Карев» (проект МИБ MPSV07). Корпус имеет ледакольные обводы носовой части, кормовая оконечность приспособлена к установке полноповоротных винто-рулевых колонок. Главные размерения представлены в таблице Д.5.

При проектировании судна был выполнен значительный объем исследовательских работ в области гидромеханики. В частности, были выполнены буксировочные испытания двух моделей, изготовленных в ЛИВТ в разных масштабах (см. таблицу Д.5). Испытания проводились в опытовом бассейне ЛИВТ [71], а затем более крупная модель была испытана и в большом опытовом бассейне КГНЦ [78]. Модельным испытаниям предшествовало численное исследование, выполненное в 2008 г. при проектировании формы корпуса судна. Сравнение расчетных и экспериментальных данных в виде коэффициентов остаточного и полного сопротивления судна представлено на рис. Д.5.

Таблица Д.5 – Главные размерения судна типа «Спасатель Карев»

Характеристики объекта	Натура	Модель №1 (М1:13)	Модель №2 (М1:42)
Длина по ватерлинии L_{WL} , м	69.0	5.3098	1.6435
Ширина B , м	15.5	1.1923	0.3690
Высота борта D , м	6.7	0.4746	0.1595
Осадка T , м	4.5	0.3462	0.1071
Водоизмещение объёмное V , м ³	3008.8	1.3695	0.0406
Площадь смоченной поверхности S , м ²	1270.1	7.5154	0.7200
Коэффициент общей полноты C_B	0.625		
Относительная абсцисса ЦВ L_{CB} (%), в нос «+»	-2.52		

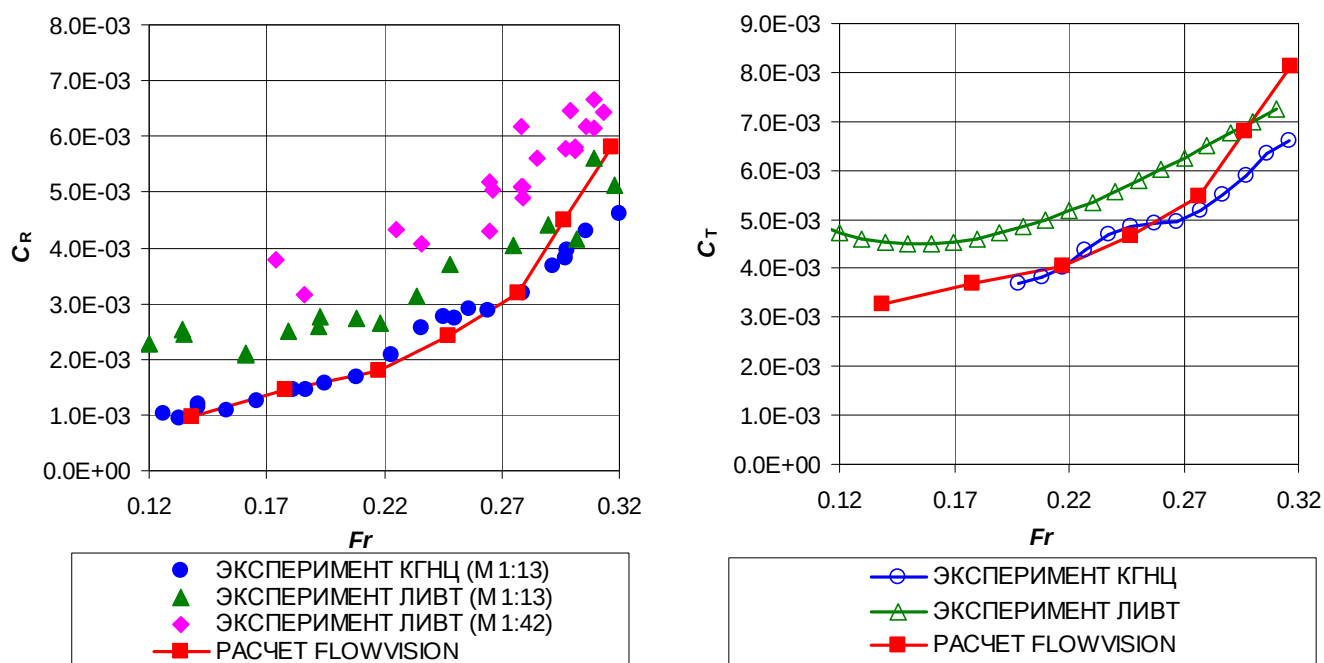


Рисунок Д.5 – Кривые коэффициентов сопротивления, судно типа «Спасатель Карев»

На рис. Д.5 данные по коэффициенту остаточного сопротивления представлены для голого корпуса. Экспериментальные значения рассчитаны непосредственно по результатам отдельных пробегов. Экспериментальные данные по коэффициенту полного сопротивления судна представляют собой

сглаженные зависимости, построенные с учетом всех имеющихся результатов по отдельным пробегам для прогноза сопротивления натурного объекта.

Как видно из рис. Д.5, результаты всех исследований существенно различаются. Можно отметить, что расчетные данные весьма удовлетворительно согласуются с данными КГНЦ, кроме наиболее высоких скоростей при $Fr > 0.28$. Более интенсивный рост сопротивления при $Fr > 0.28$ в численном исследовании связан с величиной ходового дифферента, которая в расчетах значительно превышала экспериментальные значения КГНЦ.

Одной из причин этого могло послужить разное положение центра тяжести (ЦТ). В численных расчетах ЦТ был задан в соответствии с проектными данными судна приблизительно на уровне палубы. В экспериментах, судя по данным отчетов, был применен обычный подход к моделированию движения водоизмещающих судов, при котором, как правило, ЦТ располагается вблизи ОП по причине загрузки модели твердым балластом.

По-видимому, режим движения объекта при максимальных Fr уже не позволяет игнорировать подобные несоответствия ввиду особенностей его формы корпуса. Корпус имеет малое относительное удлинение $L/B = 4.45$ и специфическую форму кормовой части с широким днищем, которая существенно снижает удельные показатели статической нагрузки. В целом, представляется, что моделирование движения данного объекта является сложной задачей не только в рамках численного, но и экспериментального подхода.

Судно тылового обеспечения типа «Эльбрус» (проект 23120 ЗАО «Спецсудопроект»). Форма корпуса спроектирована с учетом необходимости обеспечения заданных ходовых и ледовых качеств. Носовая оконечность бульбообразная, кормовая оконечность крейсерская, приспособленная к установке полноповоротных винто-рулевых колонок. Главные размерения представлены в таблице Д.6.

Таблица Д.6 – Главные размерения судна типа «Эльбрус»

Характеристики объекта	Натура	Модель (М1:17.65)
Длина по ватерлинии L_{WL} , м	89.3	5.0581
Ширина B , м	22.0	1.2465
Высота борта D , м	11.2	0.6346
Осадка T , м	8.5	0.4816
Водоизмещение объёмное V , м ³	9153.8	1.6648
Площадь смоченной поверхности S , м ²	2552.7	8.1943
Коэффициент общей полноты C_B	0.548	
Относительная абсцисса центра величины L_{CB} (%), в нос «+»	+0.24	

Численное исследование выполнялось в 2013 г. при проектировании формы корпуса. Модельные испытания проводились в Техническом исследовательском центре Финляндии, VTT. Сравнение расчетных и экспериментальных данных в виде коэффициентов остаточного и полного сопротивления натурного голого корпуса представлено на рис. Д.6.

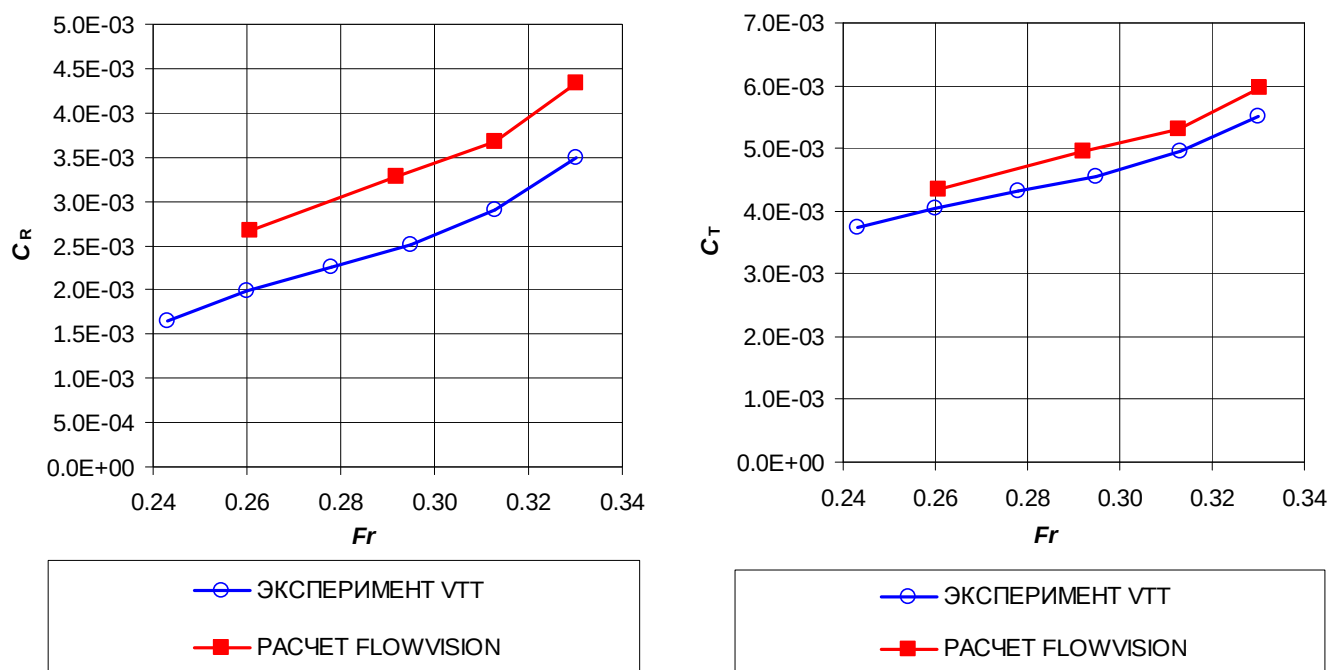


Рисунок Д.6 – Кривые коэффициентов сопротивления, судно типа «Эльбрус»

Из рис. Д.6. видно, что расчетные значения коэффициентов выше экспериментальных. Особенно большое различие имеет место между значениями коэффициента остаточного сопротивления, хотя кривые и имеют вполне подобную форму. Между значениями коэффициента полного сопротивления различия уже не столь велики, и соответствуют примерно 5-6% буксировочной мощности натурного голого корпуса.

Эта ситуация объясняется тем, что в величину коэффициента полного сопротивления голого корпуса специалистами VTT была включена корреляционная надбавка величиной $0.4407 \cdot 10^{-3}$, не связанная с учетом каких-либо видов дополнительного сопротивления натурного судна или условий его испытаний. По-видимому, данная надбавка служит для учета особенностей проведения эксперимента в опытовом бассейне VTT – например, устраняет влияние чрезмерного стеснения потока или недостаточную эффективность его искусственной турбулизации. Во всяком случае, из рис. Д.6. видно, что по величине указанная надбавка как раз сопоставима с разницей между расчетными и экспериментальными значениями коэффициента остаточного сопротивления. Следовательно, даже небольшие вариации величины надбавки, которая, очевидно, выбирается эмпирически, могут существенно влиять на экспериментальные значения коэффициента полного сопротивления, а, значит, и на результаты сравнения.

Информация о проектировании формы корпуса судна типа «Эльбрус» и выполненных численных и экспериментальных исследованиях опубликована в [55, 77].

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

СОГЛАШЕНИЕ О НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СОТРУДНИЧЕСТВЕ МЕЖДУ НУ «ОМА» И ОНМУ

Проректор по научной работе
Одесской национальной
морской академии,
проф., д.т.н.


В.А. Голиков
11 ноября 2014г.


Проректор по научной работе
Одесского национального
морского университета,
директор НИИ фундаментальных
и прикладных исследований,
проф., д.т.н.


С.В. Руденко
12 ноября 2014г.


СОГЛАШЕНИЕ о научно-техническом сотрудничестве

Одесская национальная морская академия, именуемая в дальнейшем ОНМА, в лице проректора по научной работе В.А. Голикова с одной Стороны и Одесский национальный морской университет, именуемый в дальнейшем ОНМУ, в лице проректора по научной работе С.В. Руденко с другой Стороны, принимая во внимание заинтересованность в научно-техническом сотрудничестве, заключили настоящее Соглашение о следующем:

1. ПРЕДМЕТ СОГЛАШЕНИЯ

Стороны настоящим заявляют о своем намерении установить, развивать и поддерживать долгосрочные партнерские отношения в научной сфере. Стороны предполагают воплощать указанное намерение по следующим возможным направлениям:

- Организация совместной деятельности Сторон по использованию современных теоретических и экспериментальных методов оценки мореходных качеств судов и плавучих технических сооружений.

2. ОБЩИЕ УСЛОВИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ

2.1. В рамках настоящего Соглашения Стороны планируют выполнить следующие работы:

- ОНМА выполняет проектирование формы корпуса тестовых объектов;
- ОНМА выполняет теоретические расчеты буксировочного сопротивления тестовых объектов;
- ОНМА выполняет проектирование формы корпуса моделей тестовых объектов для экспериментальных оценок буксировочного сопротивления;
- ОНМУ изготавливает модели тестовых объектов;
- ОНМУ выполняет буксировочные испытания соответствующих моделей в опытовом бассейне;
- ОНМУ и ОНМА совместно выполняют обработку результатов экспериментальных исследований;
- ОНМА выполняет анализ и сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

В ходе выполнения настоящего Соглашения перечисленные виды работ могут уточняться и дополняться.

- 2.2. Порядок выполнения работ, предусматриваемых настоящим Соглашением, определяется специальными рабочими программами, договорами, контрактами, разработанными и подписанными Сторонами в надлежащем порядке.
- 2.3. Непосредственная работа и соответствующее администрирование в рамках данного Соглашения осуществляется в ОНМА на базе кафедры «Теория и устройство судна», ответственный координатор И.Ф. Давыдов, в ОНМУ - на базе кафедры «Кафедра теории и проектирования корабля им. проф. Ю.Л. Воробьева», ответственный координатор А.В. Демидюк.
- 2.4. Настоящее соглашение не влечет никаких финансовых обязательств для Сторон.

3. СРОК ДЕЙСТВИЯ СОГЛАШЕНИЯ

- 3.1. Настоящее Соглашение вступает в силу с даты его подписания обеими Сторонами и действует в течение пяти лет.
- 3.2. Настоящее Соглашение имеет стратегический характер и предполагает последующее продление срока его действия в случае дальнейшего совпадения интересов Сторон.
- 3.3. Настоящее Соглашение составлено в двух подлинных экземплярах, имеющих одинаковую юридическую силу. Один экземпляр хранится в ОНМА и один в ОНМУ.

4. ИЗМЕНЕНИЕ И РАСТОРЖЕНИЕ СОГЛАШЕНИЯ

- 4.1. Настоящее Соглашение может быть изменено или дополнено только по обоюдному согласию Сторон, совершенному в письменной форме.
- 4.2. Настоящее Соглашение может быть расторгнуто любой из Сторон до истечения его срока действия путем одностороннего отказа от его исполнения, при условии, что такой отказ будет в письменной форме направлен другой Стороне за один месяц до момента расторжения письменно с указанием о дате его расторжения.

5. СПОРЫ И РАЗНОГЛАСИЯ

- 5.1. Споры и разногласия, возникающие из настоящего Соглашения или в связи с ним, Стороны решают путем переговоров и, в случае выработки взаимоприемлемых решений, оформляют их в виде дополнений к настоящему Соглашению.
- 5.2. Споры и разногласия, которые Стороны не смогли решить путем переговоров, подлежат разрешению компетентным арбитражным судом в соответствии с законодательством Украины.

6. ЮРИДИЧЕСКИЕ АДРЕСА И ПОДПИСИ СТОРОН

ОНМА:

Юридический адрес: 65029, Украина, Одесса, ул. Дидрихсона, 8

ОНМУ:

Юридический адрес: 65000, Украина, Одесса, ул. Мечникова, 34

От Одесской национальной
морской академии

Начальник НИЧ,
профессор, к.т.н.



В.Д. Савчук

Научный руководитель,
зав. каф. «Теория и устройство судна»,
доцент, к.т.н.



И.А. Бурмака

Ответственный исполнитель,
аспирант каф. «Теория и устройство судна»
ОНМА, инженер-кораблестроитель



А.В. Печенюк

От Одесского национального
морского университета

Зам. директора НИИ фундаментальных и
прикладных исследований,
доцент, к.т.н.



С.А. Медведев

Научный руководитель,
доцент каф. «Кафедра теории и
проектирования
корабля им. проф. Ю.Л. Воробьева» ОНМУ,
к.т.н.



А.В. Демидук

Ответственный исполнитель,
инженер опытового бассейна каф. «Кафедра
теории и проектирования корабля им. проф.
Ю.Л. Воробьева» ОНМУ



В.В. Литвиненко

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ (ОПЫТОВЫЙ
БАССЕЙН ГРАВИТАЦИОННОГО ТИПА)

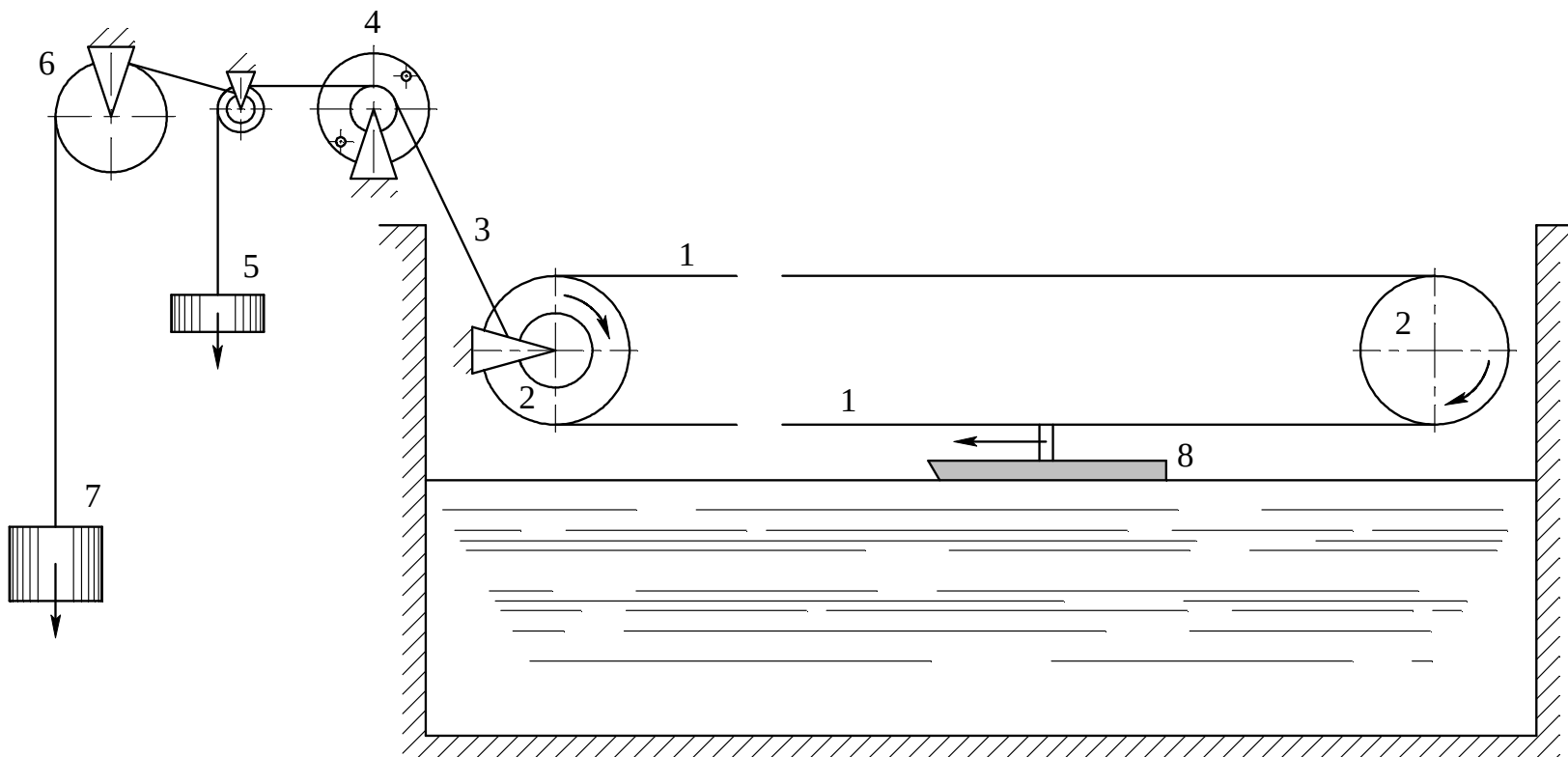


Рисунок Е.1 – Схема опытового бассейна гравитационного типа

1 – буксирный трос; 2 – ведущие колеса; 3 – ведущий трос; 4 – система измерения скорости движения модели; 5 – буксирующий груз; 6 – разгонное устройство; 7 – разгонный груз; 8 – модель

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
ФОТОГРАФИИ ИСПЫТАННЫХ МОДЕЛЕЙ



Рисунок 3.1 – Общий вид модели (модель 2)



Рисунок 3.2 – Носовая часть модели 1 (исходные носовые обводы)



Рисунок 3.3 – Носовая часть модели 3 (бульбовая наделка)

ПРИЛОЖЕНИЕ И

ПРОТОКОЛЫ ДАННЫХ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Модель № 1		Температура воды t , С	17
Протокол № 1	16.06.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.8
Буксирующий груз P_B , кг	0.200	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.081E-6
Движение по мерному участку, с	38-53	Расчетная глубина воды Н/Т	>10

Пробег № 1		Пробег № 2		Пробег № 3	
Разгонный груз Р _Р , кг					
0.500		0.600		0.650	
t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с
37.97	0.4921	38.23	0.5061	38.02	0.5165
38.48	0.4941	38.72	0.5102	38.50	0.5165
38.99	0.4941	39.22	0.5081	38.99	0.5165
39.49	0.4941	39.71	0.5081	39.47	0.5165
40.00	0.4941	40.20	0.5102	39.96	0.5144
40.50	0.4941	40.69	0.5081	40.44	0.5187
41.01	0.4960	41.18	0.5081	40.92	0.5165
41.51	0.4960	41.67	0.5102	41.41	0.5165
42.02	0.4960	42.16	0.5081	41.89	0.5144
42.52	0.4960	42.65	0.5102	42.38	0.5165
43.02	0.4980	43.15	0.5081	42.86	0.5165
43.53	0.4960	43.64	0.5102	43.35	0.5165
44.03	0.4980	44.13	0.5102	43.83	0.5165
44.53	0.5000	44.62	0.5102	44.31	0.5165
45.03	0.4980	45.11	0.5102	44.80	0.5165
45.53	0.5000	45.60	0.5102	45.28	0.5165
46.03	0.4980	46.09	0.5102	45.77	0.5144
46.53	0.4980	46.58	0.5102	46.25	0.5187
47.03	0.5000	47.07	0.5102	46.73	0.5165
47.53	0.5000	47.56	0.5102	47.22	0.5165
48.03	0.5000	48.05	0.5102	47.70	0.5144
48.53	0.5020	48.53	0.5123	48.19	0.5165
49.03	0.5000	49.02	0.5102	48.67	0.5144
49.53	0.5000	49.51	0.5102	49.16	0.5165
50.03	0.5000	50.00	0.5102	49.64	0.5165
50.53	0.5020	50.49	0.5102	50.13	0.5165
51.03	0.5020	50.98	0.5123	50.61	0.5144
51.53	0.5020	51.47	0.5102	51.10	0.5165
52.03	0.5000	51.96	0.5123	51.58	0.5144
52.52	0.5020	52.45	0.5102	52.07	0.5144
53.02	0.5020	52.94	0.5102	52.55	0.5165
53.52	0.5000	53.43	0.5102	53.04	0.5144
Средняя скорость на мерном участке v _{ср} , м/с					
0.4979		0.5099		0.5161	
Отклонение скорости Δv, м/с					
0.0076		0.0018		-0.0013	
Отклонение скорости Δv/v _{ср}					
1.53%		0.36%		-0.25%	

Пробег с минимальным отклонением

№ 3

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

0.5161

Модель № 1		Температура воды t , °C	17
Протокол № 2	16.06.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.8
Буксирующий груз P_B , кг	0.300	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.081E-6
Движение по мерному участку, с	27-40	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1		Пробег № 2		Пробег № 3	
Разгонный груз Р _Р , кг					
1.000		1.050		1.100	
t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с
27.12	0.6378	27.27	0.6410	27.13	0.6510
27.51	0.6410	27.66	0.6443	27.52	0.6510
27.90	0.6378	28.05	0.6410	27.90	0.6477
28.29	0.6410	28.43	0.6443	28.29	0.6477
28.68	0.6378	28.82	0.6410	28.67	0.6510
29.07	0.6410	29.21	0.6443	29.06	0.6477
29.46	0.6410	29.60	0.6410	29.44	0.6477
29.85	0.6378	29.99	0.6443	29.83	0.6510
30.24	0.6410	30.38	0.6410	30.21	0.6477
30.63	0.6410	30.77	0.6443	30.60	0.6477
31.02	0.6410	31.16	0.6443	30.98	0.6510
31.41	0.6410	31.54	0.6443	31.37	0.6477
31.80	0.6410	31.93	0.6410	31.75	0.6477
32.19	0.6410	32.32	0.6443	32.14	0.6477
32.58	0.6410	32.71	0.6443	32.53	0.6510
32.97	0.6410	33.10	0.6410	32.91	0.6477
33.36	0.6443	33.49	0.6443	33.30	0.6477
33.75	0.6410	33.88	0.6443	33.68	0.6477
34.14	0.6410	34.26	0.6443	34.07	0.6510
34.53	0.6443	34.65	0.6443	34.45	0.6477
34.92	0.6410	35.04	0.6410	34.84	0.6477
35.31	0.6410	35.43	0.6443	35.22	0.6477
35.70	0.6443	35.82	0.6443	35.61	0.6477
36.09	0.6410	36.21	0.6443	36.00	0.6477
36.48	0.6443	36.59	0.6443	36.38	0.6477
36.87	0.6410	36.98	0.6410	36.77	0.6510
37.25	0.6443	37.37	0.6443	37.15	0.6477
37.64	0.6410	37.76	0.6443	37.54	0.6477
38.03	0.6443	38.15	0.6443	37.92	0.6477
38.42	0.6443	38.54	0.6443	38.31	0.6477
38.81	0.6410	38.92	0.6443	38.70	0.6477
39.20	0.6443	39.31	0.6443	39.08	0.6477
39.59	0.6410	39.70	0.6410	39.47	0.6477
39.98	0.6443	40.09	0.6443	39.85	0.6443
40.36	0.6443			40.24	0.6510

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

0.6483 0.6434 0.6494

Отклонение скорости $\Delta \nu$, м/с

0.0045 0.0014 -0.0021

Отклонение скорости $\Delta \nu / \nu_{cp}$

0.70% 0.22% -0.33%

Пробег с минимальным отклонением

№ 2

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

0.6434

Модель № 1		Температура воды t , °C	17
Протокол № 3	16.06.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.8
Буксирующий груз P_B , кг	0.500	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.081E-6
Движение по мерному участку, с	20-29	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1		Пробег № 2		Пробег № 3	
Разгонный груз Р _Р , кг					
1.700		1.750		1.800	
t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с
20.20	0.8224	20.03	0.8224	20.03	0.8333
20.51	0.8224	20.34	0.8224	20.33	0.8333
20.81	0.8224	20.64	0.8170	20.63	0.8333
21.11	0.8224	20.94	0.8278	20.93	0.8333
21.42	0.8224	21.25	0.8224	21.23	0.8333
21.72	0.8170	21.55	0.8224	21.53	0.8333
22.03	0.8224	21.86	0.8224	21.83	0.8333
22.33	0.8224	22.16	0.8224	22.13	0.8333
22.64	0.8224	22.46	0.8224	22.43	0.8278
22.94	0.8224	22.77	0.8278	22.73	0.8333
23.24	0.8224	23.07	0.8224	23.03	0.8333
23.55	0.8224	23.37	0.8224	23.34	0.8278
23.85	0.8224	23.68	0.8224	23.64	0.8333
24.16	0.8224	23.98	0.8278	23.94	0.8333
24.46	0.8224	24.28	0.8224	24.24	0.8278
24.76	0.8224	24.59	0.8224	24.54	0.8333
25.07	0.8224	24.89	0.8224	24.84	0.8278
25.37	0.8224	25.19	0.8278	25.14	0.8333
25.68	0.8224	25.50	0.8224	25.44	0.8278
25.98	0.8224	25.80	0.8224	25.74	0.8333
26.28	0.8224	26.10	0.8278	26.04	0.8278
26.59	0.8224	26.41	0.8224	26.34	0.8333
26.89	0.8224	26.71	0.8224	26.65	0.8278
27.19	0.8278	27.01	0.8278	26.95	0.8333
27.50	0.8224	27.32	0.8224	27.25	0.8278
27.80	0.8224	27.62	0.8224	27.55	0.8278
28.11	0.8224	27.92	0.8278	27.85	0.8333
28.41	0.8224	28.23	0.8224	28.15	0.8278
28.71	0.8224	28.53	0.8224	28.45	0.8278
29.02	0.8224	28.83	0.8278	28.76	0.8278
		29.14	0.8224	29.06	0.8278

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

0.8224 0.8236 0.8310

Отклонение скорости $\Delta\nu$, м/с

0.0013 0.0021 -0.0051

Отклонение скорости $\Delta\nu/\nu_{cp}$

0.16% 0.26% -0.62%

Пробег с минимальным отклонением

№ 1

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

0.8224

Модель № 1		Температура воды t , °C	17
Протокол № 4	16.06.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.8
Буксирующий груз P_B , кг	0.700	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.081E-6
Движение по мерному участку, с	16-25	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1

Пробег № 2

Пробег № 3

Разгонный груз P_p , кг

2.100

2.200

2.300

t , с	ν , м/с	t , с	ν , м/с	t , с	ν , м/с
16.08	0.9328	15.98	0.9399	16.14	0.9470
16.35	0.9399	16.25	0.9328	16.41	0.9470
16.61	0.9328	16.52	0.9328	16.67	0.9470
16.88	0.9399	16.78	0.9399	16.93	0.9470
17.15	0.9399	17.05	0.9328	17.20	0.9399
17.41	0.9328	17.32	0.9328	17.46	0.9470
17.68	0.9399	17.58	0.9399	17.73	0.9399
17.95	0.9399	17.85	0.9328	17.99	0.9470
18.21	0.9399	18.12	0.9399	18.26	0.9399
18.48	0.9399	18.39	0.9328	18.52	0.9470
18.75	0.9328	18.65	0.9328	18.79	0.9399
19.01	0.9399	18.92	0.9328	19.06	0.9399
19.28	0.9399	19.19	0.9399	19.32	0.9470
19.54	0.9399	19.46	0.9328	19.59	0.9399
19.81	0.9399	19.72	0.9328	19.85	0.9399
20.08	0.9399	19.99	0.9399	20.12	0.9399
20.34	0.9399	20.26	0.9328	20.38	0.9399
20.61	0.9399	20.53	0.9328	20.65	0.9470
20.87	0.9399	20.79	0.9399	20.91	0.9399
21.14	0.9399	21.06	0.9328	21.18	0.9399
21.41	0.9399	21.33	0.9328	21.45	0.9399
21.67	0.9470	21.60	0.9328	21.71	0.9399
21.94	0.9399	21.86	0.9399	21.98	0.9399
22.20	0.9399	22.13	0.9328	22.24	0.9399
22.47	0.9399	22.40	0.9328	22.51	0.9399
22.73	0.9399	22.67	0.9328	22.78	0.9399
23.00	0.9399	22.93	0.9399	23.04	0.9399
23.26	0.9470	23.20	0.9328	23.31	0.9328
23.53	0.9399	23.47	0.9328	23.58	0.9399
23.80	0.9399	23.74	0.9328	23.84	0.9399
24.06	0.9399	24.00	0.9399	24.11	0.9399
24.33	0.9470	24.27	0.9328	24.38	0.9328
24.59	0.9399	24.54	0.9328	24.64	0.9399
24.86	0.9399	24.81	0.9328	24.91	0.9399
25.12	0.9399	25.07	0.9328	25.17	0.9399

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

0.9397

0.9347

0.9413

Отклонение скорости $\Delta \nu$, м/с

0.0053

-0.0013

-0.0081

Отклонение скорости $\Delta \nu / \nu_{cp}$

0.56%

-0.14%

-0.87%

Пробег с минимальным отклонением

№ 2

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

0.9347

Модель № 1		Температура воды t , °C	17
Протокол № 5	16.06.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.8
Буксирующий груз P_B , кг	1.100	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.081E-6
Движение по мерному участку, с	17-23.5	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1		Пробег № 2		Пробег № 3		Пробег № 4	
Разгонный груз Р _Р , кг							
2.400		2.600		2.700		2.800	
t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с
17.00	1.0684	17.14	1.0776	17.05	1.0684	17.05	1.0870
17.23	1.0776	17.37	1.0776	17.29	1.0776	17.28	1.0870
17.46	1.0684	17.60	1.0776	17.52	1.0776	17.51	1.0870
17.69	1.0776	17.83	1.0776	17.75	1.0684	17.74	1.0870
17.93	1.0776	18.07	1.0776	17.98	1.0776	17.97	1.0965
18.16	1.0684	18.30	1.0776	18.22	1.0776	18.20	1.0870
18.39	1.0776	18.53	1.0684	18.45	1.0684	18.43	1.0870
18.62	1.0776	18.76	1.0776	18.68	1.0776	18.66	1.0870
18.86	1.0776	19.00	1.0776	18.92	1.0684	18.89	1.0870
19.09	1.0776	19.23	1.0776	19.15	1.0776	19.12	1.0776
19.32	1.0684	19.46	1.0776	19.38	1.0776	19.35	1.0870
19.55	1.0776	19.69	1.0776	19.61	1.0684	19.58	1.0870
19.79	1.0776	19.93	1.0684	19.85	1.0776	19.81	1.0870
20.02	1.0776	20.16	1.0776	20.08	1.0684	20.04	1.0870
20.25	1.0776	20.39	1.0776	20.31	1.0776	20.27	1.0870
20.48	1.0776	20.62	1.0776	20.54	1.0776	20.50	1.0870
20.71	1.0776	20.85	1.0776	20.78	1.0684	20.73	1.0776
20.95	1.0776	21.09	1.0684	21.01	1.0776	20.96	1.0870
21.18	1.0776	21.32	1.0776	21.24	1.0776	21.19	1.0870
21.41	1.0776	21.55	1.0776	21.48	1.0684	21.43	1.0776
21.64	1.0776	21.78	1.0776	21.71	1.0776	21.66	1.0870
21.87	1.0776	22.02	1.0684	21.94	1.0776	21.89	1.0870
22.11	1.0776	22.25	1.0776	22.17	1.0684	22.12	1.0870
22.34	1.0776	22.48	1.0776	22.41	1.0776	22.35	1.0776
22.57	1.0776	22.71	1.0776	22.64	1.0684	22.58	1.0870
22.80	1.0776	22.95	1.0684	22.87	1.0776	22.81	1.0870
23.03	1.0870	23.18	1.0776	23.10	1.0776	23.04	1.0870
23.26	1.0776	23.41	1.0776	23.34	1.0684	23.27	1.0776
23.50	1.0776	23.64	1.0776	23.57	1.0776	23.50	1.0870

Средняя скорость на мерном участке v_{cp} , м/с

1.0766 1.0760 1.0741 1.0857

Отклонение скорости Δv , м/с

0.0054 -0.0014 0.0006 -0.0045

Отклонение скорости $\Delta v/v_{cp}$

0.50% -0.13% 0.06% -0.41%

Пробег с минимальным отклонением

№ 3

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

1.0741

Модель № 2		Температура воды t , °C	18.5
Протокол № 1	10.07.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.5
Буксирующий груз P_B , кг	0.200	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.040E-6
Движение по мерному участку, с	35-52	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1	Пробег № 2	Пробег № 3
Разгонный груз P_p , кг		

0.600		0.650		0.700	
t , с	ν , м/с	t , с	ν , м/с	t , с	ν , м/с
35.29	0.5187	35.31	0.5411	35.34	0.5365
35.77	0.5187	35.77	0.5411	35.81	0.5388
36.26	0.5165	36.24	0.5388	36.27	0.5388
36.74	0.5208	36.70	0.5411	36.73	0.5388
37.22	0.5187	37.16	0.5411	37.20	0.5388
37.70	0.5208	37.62	0.5411	37.66	0.5388
38.18	0.5208	38.09	0.5388	38.13	0.5388
38.66	0.5208	38.55	0.5411	38.59	0.5388
39.14	0.5208	39.01	0.5411	39.05	0.5388
39.62	0.5208	39.48	0.5388	39.52	0.5388
40.10	0.5208	39.94	0.5411	39.98	0.5388
40.58	0.5230	40.40	0.5411	40.45	0.5388
41.06	0.5208	40.86	0.5388	40.91	0.5388
41.53	0.5230	41.33	0.5411	41.37	0.5388
42.01	0.5230	41.79	0.5411	41.84	0.5388
42.49	0.5230	42.25	0.5388	42.30	0.5388
42.97	0.5230	42.71	0.5411	42.77	0.5388
43.45	0.5230	43.18	0.5388	43.23	0.5365
43.92	0.5230	43.64	0.5411	43.70	0.5388
44.40	0.5230	44.10	0.5388	44.16	0.5388
44.88	0.5230	44.57	0.5411	44.62	0.5388
45.36	0.5252	45.03	0.5388	45.09	0.5388
45.83	0.5252	45.49	0.5411	45.55	0.5388
46.31	0.5252	45.96	0.5388	46.02	0.5365
46.79	0.5230	46.42	0.5388	46.48	0.5388
47.26	0.5252	46.88	0.5388	46.95	0.5365
47.74	0.5252	47.35	0.5388	47.41	0.5388
48.21	0.5252	47.81	0.5388	47.88	0.5365
48.69	0.5252	48.28	0.5388	48.34	0.5388
49.17	0.5252	48.74	0.5388	48.81	0.5388
49.64	0.5252	49.20	0.5388	49.27	0.5365
50.12	0.5252	49.67	0.5388	49.74	0.5365
50.59	0.5252	50.13	0.5388	50.20	0.5388
51.07	0.5274	50.60	0.5365	50.67	0.5365
51.54	0.5252	51.06	0.5388	51.13	0.5365
52.02	0.5252	51.53	0.5365	51.60	0.5342
		51.99	0.5365	52.07	0.5365
		52.46	0.5365		

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

0.5229	0.5395	0.5380
--------	--------	--------

Отклонение скорости $\Delta \nu$, м/с

0.0085	-0.0029	-0.0019
--------	---------	---------

Отклонение скорости $\Delta \nu / \nu_{cp}$

1.62%	-0.53%	-0.36%
-------	--------	--------

Пробег с минимальным отклонением

№ 3

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

0.5380

Модель № 2		Температура воды t , °C	18.5
Протокол № 2	10.07.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.5
Буксирующий груз P_B , кг	0.300	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.040E-6
Движение по мерному участку, с	23-36	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1

Пробег № 2

Пробег № 3

Разгонный груз P_R , кг

1.100

1.200

1.300

t , с	ν , м/с	t , с	ν , м/с	t , с	ν , м/с
23.06	0.6649	23.13	0.6720	23.24	0.6831
23.44	0.6614	23.50	0.6684	23.61	0.6831
23.81	0.6684	23.88	0.6720	23.98	0.6793
24.19	0.6614	24.25	0.6684	24.34	0.6831
24.56	0.6684	24.62	0.6720	24.71	0.6831
24.94	0.6649	24.99	0.6720	25.08	0.6793
25.31	0.6649	25.37	0.6684	25.44	0.6831
25.69	0.6649	25.74	0.6720	25.81	0.6793
26.07	0.6649	26.11	0.6684	26.18	0.6831
26.44	0.6649	26.49	0.6720	26.54	0.6793
26.82	0.6684	26.86	0.6684	26.91	0.6793
27.19	0.6649	27.23	0.6720	27.28	0.6793
27.57	0.6649	27.60	0.6720	27.65	0.6793
27.94	0.6684	27.98	0.6684	28.02	0.6793
28.32	0.6649	28.35	0.6720	28.38	0.6793
28.69	0.6649	28.72	0.6684	28.75	0.6793
29.07	0.6684	29.10	0.6720	29.12	0.6793
29.44	0.6649	29.47	0.6684	29.49	0.6793
29.82	0.6684	29.84	0.6684	29.86	0.6793
30.19	0.6649	30.22	0.6720	30.23	0.6757
30.57	0.6684	30.59	0.6720	30.59	0.6793
30.94	0.6649	30.96	0.6684	30.96	0.6793
31.32	0.6684	31.33	0.6720	31.33	0.6757
31.69	0.6649	31.71	0.6684	31.70	0.6793
32.07	0.6684	32.08	0.6684	32.07	0.6757
32.44	0.6649	32.45	0.6720	32.44	0.6793
32.82	0.6684	32.83	0.6684	32.81	0.6757
33.19	0.6649	33.20	0.6720	33.18	0.6757
33.57	0.6684	33.57	0.6684	33.55	0.6793
33.94	0.6649	33.95	0.6684	33.92	0.6757
34.32	0.6684	34.32	0.6720	34.29	0.6757
34.69	0.6684	34.69	0.6684	34.66	0.6757
35.07	0.6649	35.07	0.6684	35.03	0.6757
35.44	0.6649	35.44	0.6684	35.40	0.6720
35.82	0.6684	35.82	0.6684	35.77	0.6757
36.19	0.6649			36.14	0.6757

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

0.6661

0.6701

0.6786

Отклонение скорости $\Delta\nu$, м/с

0.0020

-0.0017

-0.0077

Отклонение скорости $\Delta\nu/\nu_{cp}$

0.30%

-0.26%

-1.14%

Пробег с минимальным отклонением

№ 2

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

0.6701

Модель № 2		Температура воды t , °C	18.5
Протокол № 3	10.07.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.5
Буксирующий груз P_B , кг	0.500	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.040E-6
Движение по мерному участку, с	18-29	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1

Пробег № 2

Пробег № 3

Разгонный груз P_p , кг

1.700

1.900

2.100

t , с	ν , м/с	t , с	ν , м/с	t , с	ν , м/с
18.24	0.8389	18.25	0.8562	18.19	0.8741
18.53	0.8389	18.54	0.8621	18.47	0.8741
18.83	0.8389	18.83	0.8562	18.76	0.8681
19.13	0.8389	19.12	0.8562	19.05	0.8741
19.43	0.8389	19.41	0.8562	19.33	0.8681
19.73	0.8389	19.71	0.8562	19.62	0.8741
20.02	0.8389	20.00	0.8621	19.91	0.8681
20.32	0.8446	20.29	0.8562	20.19	0.8741
20.62	0.8389	20.58	0.8562	20.48	0.8681
20.91	0.8446	20.87	0.8562	20.77	0.8681
21.21	0.8389	21.16	0.8621	21.06	0.8681
21.51	0.8446	21.45	0.8562	21.34	0.8741
21.81	0.8389	21.75	0.8562	21.63	0.8681
22.10	0.8446	22.04	0.8562	21.92	0.8681
22.40	0.8446	22.33	0.8562	22.21	0.8681
22.70	0.8389	22.62	0.8621	22.50	0.8681
22.99	0.8446	22.91	0.8562	22.78	0.8681
23.29	0.8446	23.20	0.8562	23.07	0.8681
23.58	0.8446	23.50	0.8562	23.36	0.8681
23.88	0.8446	23.79	0.8562	23.65	0.8621
24.18	0.8446	24.08	0.8562	23.94	0.8681
24.47	0.8446	24.37	0.8621	24.23	0.8681
24.77	0.8446	24.66	0.8562	24.51	0.8681
25.06	0.8446	24.95	0.8562	24.80	0.8621
25.36	0.8446	25.25	0.8562	25.09	0.8681
25.66	0.8446	25.54	0.8562	25.38	0.8621
25.95	0.8446	25.83	0.8562	25.67	0.8681
26.25	0.8446	26.12	0.8562	25.96	0.8621
26.54	0.8503	26.41	0.8562	26.25	0.8681
26.84	0.8446	26.71	0.8562	26.54	0.8621
27.13	0.8446	27.00	0.8562	26.83	0.8681
27.43	0.8446	27.29	0.8562	27.12	0.8621
27.72	0.8503	27.58	0.8562	27.41	0.8621
28.02	0.8446	27.87	0.8562	27.70	0.8621
28.32	0.8446	28.17	0.8562	27.99	0.8621
28.61	0.8503	28.46	0.8562	28.28	0.8621
28.91	0.8446	28.75	0.8562	28.57	0.8621
29.20	0.8446	29.04	0.8562	28.86	0.8621

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

0.8434

0.8569

0.8671

Отклонение скорости $\Delta\nu$, м/с

0.0077

-0.0019

-0.0111

Отклонение скорости $\Delta\nu/\nu_{cp}$

0.92%

-0.22%

-1.28%

Пробег с минимальным отклонением

№ 2

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

0.8569

Модель № 2		Температура воды t , °C	18.5
Протокол № 4	10.07.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.5
Буксирующий груз P_B , кг	0.700	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.040E-6
Движение по мерному участку, с	16-25	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1

Пробег № 2

Пробег № 3

Разгонный груз P_p , кг

2.100

2.300

2.500

t , с	ν , м/с	t , с	ν , м/с	t , с	ν , м/с
16.15	0.9542	16.03	0.9690	16.00	0.9843
16.42	0.9542	16.29	0.9690	16.25	0.9766
16.68	0.9542	16.55	0.9690	16.51	0.9766
16.94	0.9615	16.80	0.9690	16.76	0.9766
17.20	0.9542	17.06	0.9690	17.02	0.9843
17.46	0.9615	17.32	0.9690	17.27	0.9766
17.72	0.9542	17.58	0.9690	17.53	0.9766
17.98	0.9615	17.84	0.9690	17.79	0.9766
18.24	0.9615	18.09	0.9766	18.04	0.9843
18.50	0.9542	18.35	0.9690	18.30	0.9766
18.76	0.9615	18.61	0.9690	18.55	0.9766
19.02	0.9615	18.87	0.9690	18.81	0.9766
19.28	0.9615	19.12	0.9766	19.06	0.9766
19.54	0.9615	19.38	0.9690	19.32	0.9843
19.80	0.9615	19.64	0.9690	19.57	0.9766
20.06	0.9615	19.90	0.9690	19.83	0.9766
20.32	0.9615	20.15	0.9766	20.09	0.9766
20.58	0.9690	20.41	0.9690	20.34	0.9766
20.84	0.9615	20.67	0.9690	20.60	0.9766
21.10	0.9615	20.92	0.9766	20.85	0.9766
21.36	0.9615	21.18	0.9690	21.11	0.9766
21.62	0.9690	21.44	0.9690	21.37	0.9766
21.88	0.9690	21.70	0.9766	21.62	0.9766
22.14	0.9615	21.95	0.9690	21.88	0.9766
22.40	0.9615	22.21	0.9690	22.13	0.9766
22.66	0.9690	22.47	0.9766	22.39	0.9766
22.91	0.9690	22.73	0.9690	22.65	0.9766
23.17	0.9615	22.98	0.9690	22.90	0.9690
23.43	0.9690	23.24	0.9766	23.16	0.9766
23.69	0.9615	23.50	0.9690	23.42	0.9766
23.95	0.9690	23.76	0.9690	23.67	0.9766
24.21	0.9690	24.01	0.9766	23.93	0.9690
24.47	0.9615	24.27	0.9690	24.19	0.9766
24.73	0.9690	24.53	0.9690	24.44	0.9766
24.98	0.9690	24.79	0.9690	24.70	0.9690
25.24	0.9615	25.04	0.9766	24.96	0.9766

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

0.9624

0.9709

0.9768

Отклонение скорости $\Delta\nu$, м/с

0.0106

0.0013

-0.0050

Отклонение скорости $\Delta\nu/\nu_{cp}$

1.10%

0.14%

-0.52%

Пробег с минимальным отклонением

№ 2

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

0.9709

Модель № 2		Температура воды t , °C	18.5
Протокол № 5	10.07.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.5
Буксирующий груз P_B , кг	0.900	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.040E-6
Движение по мерному участку, с	19-25	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1		Пробег № 2		Пробег № 3		Пробег № 4	
Разгонный груз Р _Р , кг							
2.500		2.700		2.900		3.100	
t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с
19.03	1.0504	19.09	1.0504	19.06	1.0593	18.98	1.0684
19.27	1.0504	19.33	1.0593	19.30	1.0593	19.22	1.0684
19.51	1.0417	19.56	1.0593	19.53	1.0593	19.45	1.0684
19.74	1.0504	19.80	1.0593	19.77	1.0593	19.69	1.0593
19.98	1.0504	20.04	1.0504	20.00	1.0684	19.92	1.0684
20.22	1.0504	20.27	1.0593	20.24	1.0504	20.15	1.0684
20.46	1.0504	20.51	1.0593	20.48	1.0593	20.39	1.0593
20.70	1.0504	20.74	1.0593	20.71	1.0593	20.62	1.0684
20.93	1.0504	20.98	1.0593	20.95	1.0593	20.86	1.0593
21.17	1.0504	21.22	1.0504	21.19	1.0593	21.09	1.0684
21.41	1.0504	21.45	1.0593	21.42	1.0593	21.33	1.0593
21.65	1.0504	21.69	1.0593	21.66	1.0593	21.56	1.0684
21.89	1.0504	21.93	1.0593	21.89	1.0593	21.80	1.0593
22.12	1.0504	22.16	1.0593	22.13	1.0593	22.04	1.0593
22.36	1.0504	22.40	1.0504	22.37	1.0593	22.27	1.0593
22.60	1.0504	22.64	1.0593	22.60	1.0593	22.51	1.0684
22.84	1.0504	22.87	1.0593	22.84	1.0504	22.74	1.0593
23.08	1.0504	23.11	1.0593	23.08	1.0593	22.98	1.0593
23.31	1.0504	23.34	1.0593	23.31	1.0593	23.21	1.0593
23.55	1.0593	23.58	1.0593	23.55	1.0593	23.45	1.0684
23.79	1.0504	23.82	1.0504	23.78	1.0593	23.68	1.0593
24.03	1.0504	24.05	1.0593	24.02	1.0504	23.92	1.0593
24.26	1.0593	24.29	1.0593	24.26	1.0593	24.16	1.0593
24.50	1.0504	24.53	1.0593	24.49	1.0593	24.39	1.0593
24.74	1.0504	24.76	1.0593	24.73	1.0593	24.63	1.0593
		25.00	1.0593	24.97	1.0504	24.86	1.0593
				25.20	1.0593	25.10	1.0593

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

1.0508 1.0576 1.0604 1.0627

Отклонение скорости $\Delta\nu$, м/с

0.0046 -0.0007 -0.0041 -0.0073

Отклонение скорости $\Delta\nu/\nu_{cp}$

0.44% -0.07% -0.39% -0.68%

Пробег с минимальным отклонением

№ 2

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

1.0576

Модель № 2		Температура воды t , °C	18.5
Протокол № 6	10.07.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.5
Буксирующий груз P_B , кг	1.100	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.040E-6
Движение по мерному участку, с	15-20	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1		Пробег № 2		Пробег № 3		Пробег № 4	
Разгонный груз Р _р , кг							
2.400		2.600		2.800		3.000	
t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с
15.12	1.0965	15.06	1.1062	15.03	1.1161	15.01	1.1161
15.35	1.0965	15.28	1.1062	15.25	1.1062	15.23	1.1261
15.57	1.0965	15.51	1.0965	15.48	1.1062	15.46	1.1062
15.80	1.0965	15.74	1.1062	15.70	1.1161	15.68	1.1161
16.03	1.1062	15.96	1.1062	15.93	1.1062	15.90	1.1161
16.26	1.0965	16.19	1.1062	16.15	1.1062	16.13	1.1161
16.48	1.0965	16.42	1.1062	16.38	1.1161	16.35	1.1161
16.71	1.1062	16.64	1.1062	16.60	1.1062	16.58	1.1161
16.94	1.0965	16.87	1.1062	16.83	1.1062	16.80	1.1161
17.16	1.1062	17.09	1.1062	17.05	1.1161	17.02	1.1161
17.39	1.1062	17.32	1.1062	17.28	1.1062	17.25	1.1062
17.62	1.0965	17.55	1.1062	17.51	1.1062	17.47	1.1161
17.84	1.1062	17.77	1.1062	17.73	1.1161	17.70	1.1161
18.07	1.1062	18.00	1.1161	17.96	1.1062	17.92	1.1161
18.30	1.0965	18.22	1.1062	18.18	1.1062	18.15	1.1062
18.52	1.1062	18.45	1.1062	18.41	1.1161	18.37	1.1161
18.75	1.1062	18.67	1.1062	18.63	1.1062	18.60	1.1161
18.98	1.1062	18.90	1.1062	18.86	1.1062	18.82	1.1062
19.20	1.0965	19.13	1.1062			19.05	1.1161
19.43	1.1062	19.35	1.1062			19.27	1.1161
19.66	1.1062	19.58	1.1062			19.50	1.1062
19.88	1.1062	19.80	1.1062			19.72	1.1161
20.11	1.1062	20.03	1.1062			19.95	1.1062
						20.17	1.1161
Средняя скорость на мерном участке v _{ср} , м/с							
1.1020		1.1062		1.1095		1.1140	
Отклонение скорости Δv, м/с							
0.0042		0.0014		0.0014		-0.0052	
Отклонение скорости Δv/v _{ср}							
0.38%		0.13%		0.13%		-0.46%	

Пробег с минимальным отклонением	№ 2, №3
Расчетная скорость буксировки ν , м/с	1.1078

Модель № 3		Температура воды t , °C	18
Протокол № 1	25.06.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.6
Буксирующий груз P_B , кг	0.200	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.054E-6
Движение по мерному участку, с	35-50	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1		Пробег № 2		Пробег № 3		Пробег № 4	
Разгонный груз Р _Р , кг							
0.500		0.600		0.650		0.700	
t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с
35.07	0.5000	35.13	0.5144	35.17	0.5208	35.14	0.5297
35.58	0.4980	35.62	0.5123	35.65	0.5230	35.61	0.5297
36.08	0.5000	36.10	0.5144	36.13	0.5230	36.08	0.5297
36.57	0.5020	36.59	0.5144	36.61	0.5208	36.55	0.5319
37.07	0.5000	37.07	0.5165	37.09	0.5230	37.02	0.5297
37.57	0.5000	37.56	0.5165	37.56	0.5230	37.49	0.5319
38.07	0.5020	38.04	0.5165	38.04	0.5252	37.96	0.5297
38.57	0.5040	38.53	0.5144	38.52	0.5230	38.44	0.5297
39.06	0.5040	39.01	0.5187	39.00	0.5230	38.91	0.5319
39.56	0.5040	39.49	0.5165	39.47	0.5252	39.38	0.5319
40.06	0.5040	39.98	0.5165	39.95	0.5230	39.85	0.5297
40.55	0.5061	40.46	0.5187	40.43	0.5252	40.32	0.5319
41.04	0.5061	40.94	0.5187	40.90	0.5230	40.79	0.5297
41.54	0.5061	41.42	0.5165	41.38	0.5252	41.26	0.5319
42.03	0.5061	41.91	0.5187	41.86	0.5252	41.73	0.5319
42.52	0.5081	42.39	0.5208	42.33	0.5252	42.20	0.5319
43.02	0.5081	42.87	0.5187	42.81	0.5252	42.67	0.5319
43.51	0.5081	43.35	0.5187	43.28	0.5252	43.14	0.5297
44.00	0.5102	43.83	0.5208	43.76	0.5252	43.61	0.5319
44.49	0.5081	44.31	0.5187	44.24	0.5252	44.08	0.5319
44.98	0.5102	44.79	0.5208	44.71	0.5252	44.55	0.5297
45.47	0.5102	45.27	0.5208	45.19	0.5252	45.02	0.5319
45.96	0.5102	45.75	0.5208	45.66	0.5252	45.49	0.5319
46.45	0.5123	46.23	0.5208	46.14	0.5274	45.96	0.5319
46.94	0.5102	46.71	0.5230	46.61	0.5252	46.44	0.5297
47.43	0.5123	47.19	0.5187	47.09	0.5274	46.91	0.5319
47.91	0.5144	47.67	0.5230	47.56	0.5252	47.38	0.5297
48.40	0.5123			48.04	0.5252	47.85	0.5319
48.89	0.5123			48.51	0.5274	48.32	0.5297
49.38	0.5123			48.99	0.5252	48.79	0.5319
49.86	0.5144			49.46	0.5274	49.26	0.5319
50.35	0.5144			49.94	0.5274	49.73	0.5297
				50.41	0.5252	50.20	0.5319

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

0.5072 0.5181 0.5247 0.5310

Отклонение скорости $\Delta\nu$, м/с

0.0153 0.0096 0.0045 0.0009

Отклонение скорости $\Delta\nu/\nu_{cp}$

3.02% 1.86% 0.86% 0.16%

Пробег с минимальным отклонением

№ 4

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

0.5310

Модель № 3		Температура воды t , °C	18
Протокол № 2	25.06.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.6
Буксирующий груз P_B , кг	0.300	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.054E-6
Движение по мерному участку, с	28-42	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1		Пробег № 2		Пробег № 3	
Разгонный груз Р _Р , кг					
1.000		1.100		1.200	
t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с
28.25	0.6443	28.28	0.6579	28.30	0.6649
28.64	0.6477	28.66	0.6545	28.67	0.6684
29.02	0.6477	29.04	0.6545	29.05	0.6684
29.41	0.6477	29.42	0.6545	29.42	0.6649
29.80	0.6477	29.80	0.6579	29.80	0.6684
30.18	0.6477	30.18	0.6545	30.17	0.6684
30.57	0.6477	30.56	0.6579	30.55	0.6649
30.95	0.6477	30.95	0.6545	30.92	0.6684
31.34	0.6510	31.33	0.6545	31.29	0.6684
31.72	0.6477	31.71	0.6579	31.67	0.6649
32.11	0.6477	32.09	0.6545	32.05	0.6649
32.49	0.6510	32.47	0.6579	32.42	0.6684
32.88	0.6477	32.85	0.6545	32.80	0.6649
33.26	0.6510	33.23	0.6579	33.17	0.6684
33.65	0.6510	33.61	0.6545	33.55	0.6649
34.03	0.6477	33.99	0.6579	33.92	0.6649
34.42	0.6510	34.37	0.6579	34.30	0.6649
34.80	0.6510	34.76	0.6545	34.67	0.6684
35.19	0.6510	35.14	0.6579	35.05	0.6649
35.57	0.6477	35.52	0.6545	35.42	0.6649
35.96	0.6510	35.90	0.6579	35.80	0.6649
36.34	0.6510	36.28	0.6545	36.18	0.6649
36.72	0.6510	36.66	0.6579	36.55	0.6649
37.11	0.6510	37.04	0.6579	36.93	0.6649
37.49	0.6510	37.42	0.6545	37.30	0.6649
37.88	0.6510	37.80	0.6579	37.68	0.6649
38.26	0.6510	38.18	0.6545	38.06	0.6614
38.64	0.6510	38.56	0.6579	38.43	0.6649
39.03	0.6510	38.95	0.6545	38.81	0.6649
39.41	0.6510	39.33	0.6579	39.19	0.6649
39.80	0.6510	39.71	0.6579	39.56	0.6614
40.18	0.6510	40.09	0.6545	39.94	0.6649
40.56	0.6510	40.47	0.6579	40.32	0.6614
40.95	0.6510	40.85	0.6545	40.70	0.6614
41.33	0.6510	41.23	0.6579	41.07	0.6649
41.72	0.6510	41.61	0.6545	41.45	0.6614
42.10	0.6510	41.99	0.6545	41.83	0.6614
				42.21	0.6614

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

0.6498 0.6561 0.6651

Отклонение скорости $\Delta \nu$, м/с

0.0046 0.0000 -0.0057

Отклонение скорости $\Delta \nu / \nu_{cp}$

0.70% 0.00% -0.86%

Пробег с минимальным отклонением

№ 2

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

0.6561

Модель № 3		Температура воды t , °C	18
Протокол № 3	25.06.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.6
Буксирующий груз P_B , кг	0.500	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.054E-6
Движение по мерному участку, с	22-33	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1

Пробег № 2

Пробег № 3

Разгонный груз P_p , кг

1.600

1.700

1.800

t , с	ν , м/с	t , с	ν , м/с	t , с	ν , м/с
22.24	0.8224	21.97	0.8333	22.19	0.8446
22.54	0.8224	22.27	0.8278	22.49	0.8389
22.85	0.8278	22.57	0.8333	22.79	0.8389
23.15	0.8224	22.87	0.8333	23.08	0.8446
23.45	0.8278	23.17	0.8333	23.38	0.8389
23.75	0.8278	23.47	0.8333	23.68	0.8389
24.06	0.8224	23.77	0.8333	23.97	0.8446
24.36	0.8278	24.07	0.8333	24.27	0.8389
24.66	0.8278	24.37	0.8333	24.57	0.8446
24.96	0.8278	24.67	0.8333	24.87	0.8389
25.27	0.8278	24.97	0.8389	25.16	0.8446
25.57	0.8278	25.27	0.8333	25.46	0.8389
25.87	0.8278	25.57	0.8333	25.76	0.8446
26.17	0.8278	25.87	0.8333	26.05	0.8389
26.47	0.8278	26.17	0.8389	26.35	0.8446
26.77	0.8333	26.47	0.8333	26.65	0.8389
27.08	0.8278	26.77	0.8389	26.94	0.8446
27.38	0.8278	27.07	0.8333	27.24	0.8389
27.68	0.8333	27.37	0.8389	27.54	0.8446
27.98	0.8278	27.67	0.8333	27.84	0.8389
28.28	0.8333	27.96	0.8389	28.13	0.8446
28.58	0.8333	28.26	0.8333	28.43	0.8389
28.88	0.8278	28.56	0.8389	28.73	0.8446
29.18	0.8333	28.86	0.8333	29.02	0.8389
29.48	0.8333	29.16	0.8389	29.32	0.8446
29.78	0.8278	29.46	0.8389	29.62	0.8389
30.08	0.8333	29.76	0.8389	29.91	0.8446
30.38	0.8333	30.06	0.8333	30.21	0.8389
30.68	0.8333	30.35	0.8389	30.51	0.8389
30.98	0.8333	30.65	0.8389	30.81	0.8446
31.28	0.8333	30.95	0.8333	31.10	0.8389
31.58	0.8333	31.25	0.8389	31.40	0.8446
31.88	0.8333	31.55	0.8389	31.70	0.8389
32.18	0.8333	31.85	0.8389	31.99	0.8446
32.48	0.8333	32.15	0.8333	32.29	0.8389
32.78	0.8333	32.44	0.8389	32.59	0.8389
33.08	0.8333	32.74	0.8389	32.89	0.8446
		33.04	0.8389	33.18	0.8389

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

0.8298

0.8357

0.8415

Отклонение скорости $\Delta \nu$, м/с

0.0098

0.0055

-0.0009

Отклонение скорости $\Delta \nu / \nu_{cp}$

1.19%

0.66%

-0.11%

Пробег с минимальным отклонением

№ 3

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

0.8415

Модель № 3		Температура воды t , °C	18
Протокол № 4	25.06.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.6
Буксирующий груз P_B , кг	0.700	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.054E-6
Движение по мерному участку, с	19-28	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1		Пробег № 2		Пробег № 3	
Разгонный груз Р _р , кг					
2.100		2.200		2.300	
t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с
19.13	0.9470	19.18	0.9470	19.03	0.9615
19.39	0.9399	19.45	0.9470	19.29	0.9542
19.66	0.9470	19.71	0.9470	19.55	0.9542
19.92	0.9470	19.98	0.9470	19.82	0.9542
20.19	0.9470	20.24	0.9470	20.08	0.9615
20.45	0.9470	20.50	0.9470	20.34	0.9542
20.71	0.9470	20.77	0.9470	20.60	0.9542
20.98	0.9399	21.03	0.9542	20.86	0.9542
21.24	0.9470	21.29	0.9470	21.12	0.9542
21.51	0.9470	21.56	0.9470	21.39	0.9542
21.77	0.9470	21.82	0.9470	21.65	0.9542
22.04	0.9470	22.08	0.9542	21.91	0.9615
22.30	0.9542	22.35	0.9470	22.17	0.9542
22.56	0.9470	22.61	0.9470	22.43	0.9542
22.83	0.9470	22.87	0.9542	22.69	0.9542
23.09	0.9470	23.14	0.9470	22.96	0.9542
23.35	0.9470	23.40	0.9470	23.22	0.9542
23.62	0.9470	23.66	0.9542	23.48	0.9542
23.88	0.9542	23.93	0.9470	23.74	0.9542
24.14	0.9470	24.19	0.9470	24.00	0.9542
24.41	0.9470	24.45	0.9542	24.27	0.9542
24.67	0.9470	24.72	0.9470	24.53	0.9542
24.94	0.9470	24.98	0.9542	24.79	0.9470
25.20	0.9542	25.24	0.9470	25.05	0.9615
25.46	0.9470	25.51	0.9542	25.32	0.9470
25.73	0.9470	25.77	0.9470	25.58	0.9542
25.99	0.9542	26.03	0.9470	25.84	0.9542
26.25	0.9470	26.30	0.9542	26.10	0.9542
26.52	0.9470	26.56	0.9470	26.36	0.9542
26.78	0.9470	26.82	0.9470	26.63	0.9542
27.04	0.9542	27.09	0.9542	26.89	0.9542
27.31	0.9470	27.35	0.9470	27.15	0.9542
27.57	0.9470	27.61	0.9542	27.41	0.9470
27.83	0.9542	27.88	0.9470	27.68	0.9542
28.10	0.9470			27.94	0.9542
				28.20	0.9470

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

0.9478 0.9491 0.9542

Отклонение скорости $\Delta\nu$, м/с

0.0038 0.0029 -0.0048

Отклонение скорости $\Delta\nu/\nu_{cp}$

0.40% 0.31% -0.50%

Пробег с минимальным отклонением

№ 2

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

0.9491

Модель № 3		Температура воды t , °C	18
Протокол № 5	25.06.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.6
Буксирующий груз P_B , кг	0.900	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.054E-6
Движение по мерному участку, с	18-27	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1		Пробег № 2		Пробег № 3	
Разгонный груз Р _Р , кг					
2.400		2.500		2.600	
t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с
18.16	1.0331	18.20	1.0246	18.08	1.0331
18.40	1.0246	18.44	1.0331	18.32	1.0331
18.65	1.0246	18.68	1.0246	18.56	1.0331
18.89	1.0246	18.93	1.0331	18.80	1.0331
19.13	1.0246	19.17	1.0246	19.05	1.0331
19.38	1.0246	19.41	1.0331	19.29	1.0331
19.62	1.0331	19.65	1.0331	19.53	1.0331
19.86	1.0246	19.90	1.0246	19.77	1.0331
20.11	1.0246	20.14	1.0331	20.01	1.0331
20.35	1.0246	20.38	1.0246	20.26	1.0331
20.59	1.0331	20.63	1.0331	20.50	1.0331
20.84	1.0246	20.87	1.0331	20.74	1.0246
21.08	1.0246	21.11	1.0246	20.98	1.0331
21.32	1.0331	21.35	1.0331	21.23	1.0331
21.57	1.0246	21.60	1.0246	21.47	1.0331
21.81	1.0246	21.84	1.0331	21.71	1.0331
22.05	1.0331	22.08	1.0331	21.95	1.0331
22.30	1.0246	22.33	1.0246	22.19	1.0331
22.54	1.0331	22.57	1.0331	22.44	1.0331
22.78	1.0246	22.81	1.0331	22.68	1.0331
23.03	1.0331	23.05	1.0246	22.92	1.0331
23.27	1.0246	23.30	1.0331	23.16	1.0246
23.51	1.0331	23.54	1.0331	23.41	1.0331
23.76	1.0246	23.78	1.0246	23.65	1.0331
24.00	1.0331	24.02	1.0331	23.89	1.0331
24.24	1.0246	24.27	1.0246	24.13	1.0331
24.48	1.0331	24.51	1.0331	24.37	1.0331
24.73	1.0246	24.75	1.0331	24.62	1.0246
24.97	1.0331	25.00	1.0246	24.86	1.0331
25.21	1.0246	25.24	1.0331	25.10	1.0331
25.46	1.0331	25.48	1.0331	25.34	1.0331
25.70	1.0246	25.72	1.0331	25.59	1.0331
25.94	1.0331	25.97	1.0246	25.83	1.0331
26.19	1.0246	26.21	1.0331	26.07	1.0246
26.43	1.0331	26.45	1.0246	26.31	1.0331
26.67	1.0246	26.69	1.0331	26.56	1.0331
26.91	1.0331	26.94	1.0246	26.80	1.0246
27.16	1.0246	27.18	1.0331		

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

1.0279 1.0297 1.0319

Отклонение скорости $\Delta \nu$, м/с

0.0004 0.0006 -0.0028

Отклонение скорости $\Delta \nu / \nu_{cp}$

0.04% 0.06% -0.27%

Пробег с минимальным отклонением

№ 2

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

1.0297

Модель № 3		Температура воды t , °C	18
Протокол № 6	25.06.2014	Плотность воды ρ , кг/м ³	998.6
Буксирующий груз P_B , кг	1.100	Кинемат. вязкость воды ν , м ² /с	1.054E-6
Движение по мерному участку, с	13.5-22	Расчетная глубина воды H/T	>10

Пробег № 1		Пробег № 2		Пробег № 3		Пробег № 4	
Разгонный груз Р _Р , кг							
2.400		2.500		2.550		2.600	
t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с	t, с	v, м/с
13.60	1.0684	13.69	1.0776	13.66	1.0776	13.57	1.0776
13.83	1.0684	13.92	1.0870	13.89	1.0870	13.80	1.0870
14.06	1.0684	14.15	1.0776	14.12	1.0870	14.03	1.0870
14.30	1.0684	14.39	1.0776	14.35	1.0776	14.26	1.0776
14.53	1.0684	14.62	1.0870	14.58	1.0870	14.49	1.0870
14.77	1.0684	14.85	1.0776	14.81	1.0870	14.72	1.0870
15.00	1.0684	15.08	1.0870	15.04	1.0870	14.95	1.0776
15.23	1.0776	15.31	1.0776	15.27	1.0870	15.18	1.0870
15.47	1.0684	15.54	1.0870	15.51	1.0776	15.41	1.0870
15.70	1.0776	15.77	1.0776	15.74	1.0870	15.64	1.0870
15.93	1.0684	16.00	1.0870	15.97	1.0870	15.87	1.0776
16.16	1.0776	16.23	1.0776	16.20	1.0870	16.10	1.0870
16.40	1.0776	16.46	1.0870	16.43	1.0870	16.33	1.0870
16.63	1.0776	16.69	1.0870	16.66	1.0870	16.56	1.0870
16.86	1.0776	16.93	1.0776	16.89	1.0870	16.80	1.0776
17.09	1.0776	17.16	1.0870	17.12	1.0870	17.03	1.0870
17.33	1.0684	17.39	1.0870	17.35	1.0776	17.26	1.0870
17.56	1.0776	17.62	1.0776	17.58	1.0870	17.49	1.0870
17.79	1.0776	17.85	1.0870	17.81	1.0870	17.72	1.0870
18.02	1.0870	18.08	1.0870	18.04	1.0870	17.95	1.0870
18.25	1.0776	18.31	1.0870	18.27	1.0870	18.18	1.0776
18.48	1.0776	18.54	1.0776	18.50	1.0870	18.41	1.0870
18.72	1.0776	18.77	1.0870	18.73	1.0870	18.64	1.0870
18.95	1.0776	19.00	1.0870	18.96	1.0870	18.87	1.0870
19.18	1.0870	19.23	1.0870	19.19	1.0870	19.10	1.0870
19.41	1.0776	19.46	1.0870	19.42	1.0870	19.33	1.0870
19.64	1.0776	19.69	1.0870	19.65	1.0870	19.56	1.0870
19.87	1.0870	19.92	1.0870	19.88	1.0870	19.79	1.0870
20.10	1.0776	20.15	1.0870	20.11	1.0870	20.02	1.0776
20.34	1.0776	20.38	1.0776	20.34	1.0870	20.25	1.0870
20.57	1.0870	20.61	1.0870	20.57	1.0870	20.48	1.0870
20.80	1.0776	20.84	1.0870	20.80	1.0965	20.71	1.0870
21.03	1.0776	21.07	1.0870	21.03	1.0870	20.94	1.0870
21.26	1.0776	21.30	1.0870	21.26	1.0870	21.17	1.0870
21.49	1.0776	21.53	1.0870	21.49	1.0870	21.40	1.0870
		21.76	1.0870	21.72	1.0870	21.63	1.0870
		21.99	1.0870	21.95	1.0870	21.86	1.0870
				22.18	1.0870	22.09	1.0776

Средняя скорость на мерном участке ν_{cp} , м/с

1.0760	1.0842	1.0862	1.0850
Отклонение скорости $\Delta \nu$, м/с			
0.0139	0.0069	0.0029	0.0023
Отклонение скорости $\Delta \nu / \nu_{cp}$			
1.30%	0.64%	0.26%	0.21%

Пробег с минимальным отклонением

№ 4

Расчетная скорость буксировки ν , м/с

1.0850

ПРИЛОЖЕНИЕ К

ПРОТОКОЛЫ ПЕРЕСЧЕТА ДАННЫХ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Таблица К.1 – Пересчет результатов испытаний модели 1

				Модель (1 : 50)		Натура	
Геометрические характеристики корпуса							
Длина по ватерлинии L _{КВЛ} , м				2.727		136.370	
Площадь смоченной поверхности S, м ²				1.273		3183.5	
Характеристики среды							
Температура воды t, °C				17		15	
Плотность воды ρ, кг/м ³				998.8		1025	
Коэффициент кинематической вязкости воды ν, м ² /с				1.081·10 ⁻⁶		1.186·10 ⁻⁶	
Ускорение свободного падения g, м/с ²				9.81			
Расчетная глубина воды				глубокая вода			
Расчетное состояние поверхности				тихая вода			
Обработка результатов испытаний модели							
V _М , м/с	Fr	Re·10 ⁻⁶	C _Р ·10 ³	C _{F0} ·10 ³	C _Т ·10 ³	R _М , кг	R _М , Н
0.5161	0.100	1.303	1.536	4.257	5.794	0.100	0.981
0.6434	0.124	1.624	1.502	4.090	5.592	0.150	1.472
0.8224	0.159	2.076	1.790	3.914	5.704	0.250	2.454
0.9347	0.181	2.359	2.356	3.827	6.183	0.350	3.435
1.0741	0.208	2.711	3.622	3.735	7.357	0.550	5.398
Буксировочные характеристики в модельном масштабе (аппроксимация C _Р (Fr))							
V _М , м/с	Fr	Re·10 ⁻⁶	C _Р ·10 ³	C _{F0} ·10 ³	C _Т ·10 ³	R _М , Н	P _Е , Вт
0.582	0.113	1.469	1.528	4.165	5.693	1.226	0.714
0.655	0.127	1.652	1.528	4.077	5.605	1.528	1.000
0.727	0.141	1.836	1.573	4.001	5.574	1.876	1.365
0.800	0.155	2.020	1.700	3.933	5.633	2.294	1.836
0.873	0.169	2.203	1.992	3.873	5.865	2.842	2.481
0.946	0.183	2.387	2.432	3.819	6.251	3.555	3.362
1.018	0.197	2.570	3.000	3.770	6.770	4.466	4.548
1.091	0.211	2.754	3.837	3.725	7.562	5.726	6.248
Буксировочные характеристики в натурном масштабе							
V _С , уз	Fr	Re·10 ⁻⁸	C _Р ·10 ³	C _{F0} ·10 ³	C _Т ·10 ³	R _Т , кН	P _Е , кВт
8.0	0.113	4.731	1.528	1.727	3.255	89.9	370.1
9.0	0.127	5.322	1.528	1.701	3.229	112.9	522.8
10.0	0.141	5.913	1.573	1.678	3.251	140.4	722.0
11.0	0.155	6.505	1.700	1.658	3.358	175.4	992.6
12.0	0.169	7.096	1.992	1.640	3.632	225.8	1393.7
13.0	0.183	7.687	2.432	1.623	4.055	295.9	1978.6
14.0	0.197	8.279	3.000	1.608	4.608	389.9	2808.1
15.0	0.211	8.870	3.837	1.594	5.431	527.6	4070.8

Таблица К.2 – Пересчет результатов испытаний модели 2

					Модель (1 : 50)		Натура	
Геометрические характеристики корпуса								
Длина по ватерлинии L _{квл} , м					2.727		136.370	
Площадь смоченной поверхности S, м ²					1.273		3183.0	
Характеристики среды								
Температура воды t, °С					18.5		15	
Плотность воды ρ, кг/м ³					998.5		1025	
Коэффициент кинематической вязкости воды ν, м ² /с					1.040·10 ⁻⁶		1.186·10 ⁻⁶	
Ускорение свободного падения g, м/с ²					9.81			
Расчетная глубина воды					глубокая вода			
Расчетное состояние поверхности					тихая вода			
Обработка результатов испытаний модели								
V _М , м/с		Fr	Re·10 ⁶	C _Р ·10 ³	C _{FO} ·10 ³	C _Т ·10 ³	R _М , кг	R _М , Н
0.5380		0.104	1.411	1.137	4.196	5.333	0.100	0.981
0.6701		0.130	1.757	1.124	4.033	5.157	0.150	1.472
0.8569		0.166	2.247	1.396	3.860	5.256	0.250	2.454
0.9709		0.188	2.545	1.956	3.776	5.733	0.350	3.435
1.0576		0.204	2.773	2.491	3.720	6.211	0.450	4.416
1.1078		0.214	2.904	3.229	3.691	6.919	0.550	5.398
Буксировочные характеристики в модельном масштабе (аппроксимация C _Р (Fr))								
V _М , м/с	Fr	Re·10 ⁶	C _Р ·10 ³	C _{FO} ·10 ³	C _Т ·10 ³	R _М , Н	P _Е , Вт	
0.582	0.113	1.469	1.124	4.165	5.289	1.139	0.663	
0.655	0.127	1.652	1.124	4.077	5.201	1.417	0.928	
0.727	0.141	1.836	1.160	4.001	5.161	1.736	1.263	
0.800	0.155	2.020	1.240	3.933	5.173	2.106	1.685	
0.873	0.169	2.203	1.449	3.873	5.322	2.578	2.251	
0.946	0.183	2.387	1.800	3.819	5.619	3.194	3.021	
1.018	0.197	2.570	2.241	3.770	6.011	3.963	4.036	
1.091	0.211	2.754	2.883	3.725	6.608	5.001	5.457	
Буксировочные характеристики в натурном масштабе								
V _С , уз	Fr	Re·10 ⁸	C _Р ·10 ³	C _{FO} ·10 ³	C _Т ·10 ³	R _Т , кН	P _Е , кВт	
8.0	0.113	4.731	1.124	1.727	2.851	78.8	324.1	
9.0	0.127	5.322	1.124	1.701	2.825	98.8	457.3	
10.0	0.141	5.913	1.160	1.678	2.838	122.5	630.2	
11.0	0.155	6.505	1.240	1.658	2.898	151.4	856.4	
12.0	0.169	7.096	1.449	1.640	3.089	192.0	1185.1	
13.0	0.183	7.687	1.800	1.623	3.423	249.7	1669.9	
14.0	0.197	8.279	2.241	1.608	3.849	325.7	2345.2	
15.0	0.211	8.870	2.883	1.594	4.477	434.8	3355.2	

Таблица К.3 – Пересчет результатов испытаний модели 3

					Модель (1 : 50)		Натура	
Геометрические характеристики корпуса								
Длина по ватерлинии L _{квл} , м					2.727		136.370	
Площадь смоченной поверхности S, м ²					1.281		3203.6	
Характеристики среды								
Температура воды t, °C					18		15	
Плотность воды ρ, кг/м ³					998.6		1025	
Коэффициент кинематической вязкости воды ν, м ² /с					1.054·10 ⁻⁶		1.186·10 ⁻⁶	
Ускорение свободного падения g, м/с ²					9.81			
Расчетная глубина воды					глубокая вода			
Расчетное состояние поверхности					тихая вода			
Обработка результатов испытаний модели								
V _М , м/с		Fr	Re·10 ⁶	C _Р ·10 ³	C _{FO} ·10 ³	C _Т ·10 ³	R _М , кг	R _М , Н
0.5310		0.103	1.375	1.225	4.216	5.441	0.100	0.981
0.6561		0.127	1.699	1.288	4.057	5.345	0.150	1.472
0.8415		0.163	2.179	1.534	3.881	5.415	0.250	2.454
0.9491		0.183	2.457	2.160	3.800	5.960	0.350	3.435
1.0297		0.199	2.666	2.764	3.746	6.510	0.450	4.416
1.0850		0.210	2.809	3.454	3.712	7.166	0.550	5.398
Буксировочные характеристики в модельном масштабе (аппроксимация C _Р (Fr))								
V _М , м/с		Fr	Re·10 ⁶	C _Р ·10 ³	C _{FO} ·10 ³	C _Т ·10 ³	R _М , Н	P _Е , Вт
0.582		0.113	1.469	1.261	4.165	5.426	1.176	0.684
0.655		0.127	1.652	1.261	4.077	5.338	1.464	0.959
0.727		0.141	1.836	1.300	4.001	5.301	1.795	1.306
0.800		0.155	2.020	1.413	3.933	5.346	2.191	1.753
0.873		0.169	2.203	1.665	3.873	5.538	2.700	2.357
0.946		0.183	2.387	2.119	3.819	5.938	3.398	3.214
1.018		0.197	2.570	2.674	3.770	6.444	4.276	4.355
1.091		0.211	2.754	3.510	3.725	7.235	5.512	6.015
Буксировочные характеристики в натурном масштабе								
V _С , уз		Fr	Re·10 ⁸	C _Р ·10 ³	C _{FO} ·10 ³	C _Т ·10 ³	R _Т , кН	P _Е , кВт
8.0		0.113	4.731	1.261	1.727	2.988	83.1	341.9
9.0		0.127	5.322	1.261	1.701	2.962	104.2	482.6
10.0		0.141	5.913	1.300	1.678	2.978	129.4	665.6
11.0		0.155	6.505	1.413	1.658	3.071	161.4	913.4
12.0		0.169	7.096	1.665	1.640	3.305	206.7	1276.2
13.0		0.183	7.687	2.119	1.623	3.742	274.8	1837.4
14.0		0.197	8.279	2.674	1.608	4.282	364.6	2625.9
15.0		0.211	8.870	3.510	1.594	5.104	498.9	3849.8

ПРИЛОЖЕНИЕ Л
ФОТОГРАФИИ БУКСИРОВКИ МОДЕЛЕЙ



Рисунок Л.1 – Буксировка модели 1 (исходные обводы)

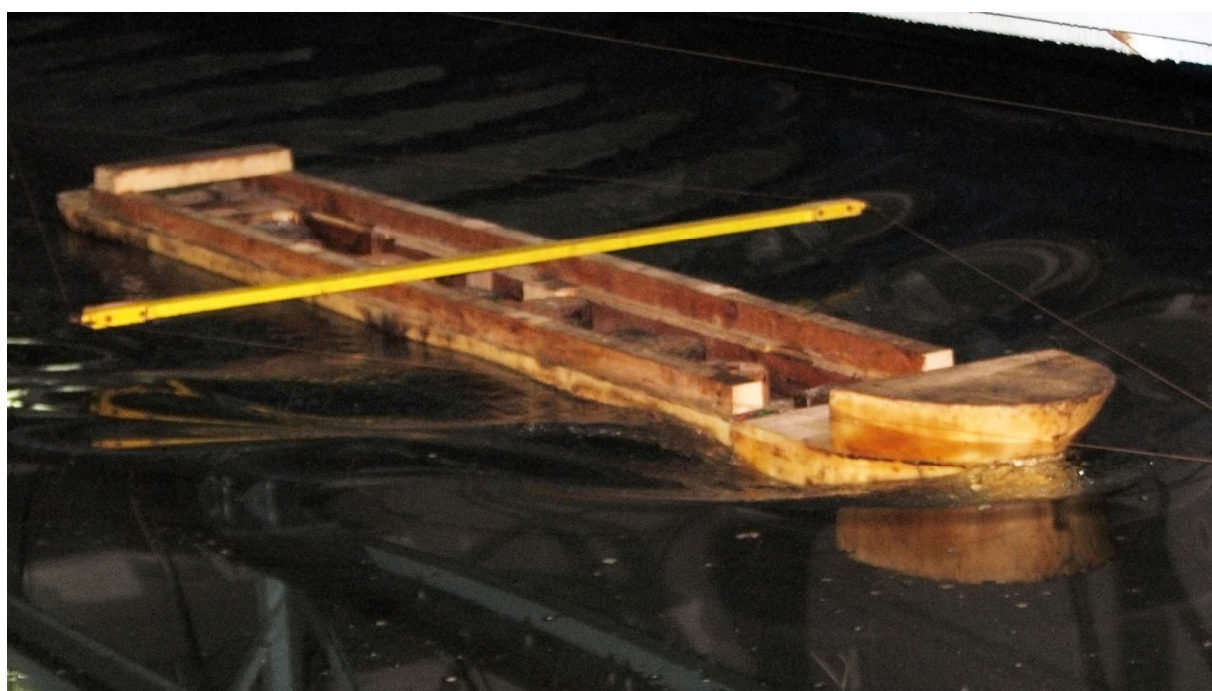


Рисунок Л.2 – Буксировка модели 3 (бульбовая наделка)

ПРИЛОЖЕНИЕ М

ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ ТУРБУЛИЗАТОРОВ

Согласно рекомендации справочника [64 , с. 321], при испытании малых моделей ($L = 2 \div 4$ м) собственное сопротивление турбулизаторов желательно учитывать. Для оценки коэффициента дополнительного сопротивления проволочного турбулизатора предлагается формула, полученная А.Ф. Пустошным и Р.С. Грозовым:

$$C_d = \frac{\Delta R_M}{\rho V^2 S / 2} = (0.6 \div 0.7) \frac{ld}{S}, \text{ где:} \quad (\text{М.1})$$

ΔR_M – дополнительное сопротивление, обусловленное турбулизатором;

l – смоченная длина турбулизатора;

d – диаметр турбулизатора.

Структура формулы (М.1) показывает, что турбулизатор рассмотрен в ней как цилиндр, обтекаемый в направлении, перпендикулярном оси, с характерной площадью миделевого сечения ld . Формула (М.1) является эмпирической, так как характерная площадь турбулизатора ld в ней отнесена к площади смоченной поверхности модели S . Очевидно, формула хорошо работает в некотором диапазоне соотношений этих площадей.

Вне привязки к статистике сопротивление изолированного цилиндра бесконечной длины при поперечном обтекании можно рассчитать по формуле вида:

$$R_d = C_d(Re_d) \frac{\rho V^2}{2} ld, \text{ где:} \quad (\text{М.2})$$

$C_d(Re_d)$ - коэффициент сопротивления цилиндра в функции числа Re ;

$Re_d = \frac{d \cdot V}{\nu}$ - число Re цилиндра при поперечном обтекании.

Очевидно, формула (М.2) не вполне отвечает условиям обтекания турбулизаторов на модели. Однако она позволяет получать адекватные результаты и при необычных соотношениях размеров.

В таблице М.1 представлена оценка сопротивления турбулизаторов модели с исходными обводами (модель 1), выполненная с помощью формул (М.1) и (М.2). Поскольку формулы не позволяют учесть разные условия обтекания первого и второго турбулизаторов, которые были установлены на нулевом и первом теоретических шпангоутах, использовалась общая длина турбулизаторов $l = 540\text{мм}$, определенная как суммарный смоченный периметр соответствующих шпангоутов по теоретическому чертежу. Входящий в формулу (М.2) коэффициент $C_d(Re_d)$ в рассмотренном диапазоне Re_d принимает значения, по различным данным, от 1.2 до 2.0. Как известно, однозначное определение зависимости $C_d(Re_d)$ до сих пор представляет собой сложную проблему. Поэтому, с учетом оценочного характера расчетов в таблице М.1, в них принято постоянное значение $C_d = 1.6$.

Таблица М.1 – Оценка сопротивления турбулизаторов

Fr	модель		натура	По (М.1)			По (М.2)		
				модель		натура	модель		натура
	V_M , м/с	R_M , Н	V_{KN} , уз.	ΔR_M , Н	$\frac{\Delta R_M}{R_M}$	$\frac{\Delta R_T}{R_T}$	ΔR_M , Н	$\frac{\Delta R_M}{R_M}$	$\frac{\Delta R_T}{R_T}$
0.113	0.582	1.226	8.0	0.089	7.3%	12.7%	0.219	17.9%	31.3%
0.127	0.655	1.528	9.0	0.113	7.4%	12.8%	0.277	18.2%	31.5%
0.141	0.727	1.876	10.0	0.139	7.4%	12.7%	0.343	18.3%	31.3%
0.155	0.800	2.294	11.0	0.168	7.3%	12.3%	0.414	18.1%	30.3%
0.169	0.873	2.842	12.0	0.200	7.0%	11.4%	0.493	17.4%	28.0%
0.183	0.946	3.555	13.0	0.235	6.6%	10.2%	0.579	16.3%	25.1%

В таблице М.1 приведены доли в процентах, которые составляет сопротивление турбулизаторов от сопротивления модели и натурального корпуса (с учетом пересчета). Относительное сопротивление турбулизаторов оказалось высоким по данным обеих формул, значительно выше обычного уровня 2-3%.

Формула (М.1) дает гораздо меньшие значения сопротивления турбулизаторов, чем формула (М.2). Возможно, для эмпирической формулы (М.1) были превышены пределы применимости. Формула (М.2) дает значения, позволяющие объяснить разницу между результатами численного моделирования и эксперимента.

ПРИЛОЖЕНИЕ Н
АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Проректор Одеської національної
морської академії по науковій роботі
д.т.н., професор

В.А. Голіков

2015 р.

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи Печенюка А.В.
на тему «Метод оптимальної трансформації носової частини судна в
задачі зниження опору його руху» в наукових дослідженнях, що
виконуються в академії

Ми, що нижче підписались: начальник науково-дослідної частини академії Савчук В.Д. та провідний фахівець НДЧ Фірсанова О.О., склали цей акт у тому, що розділ дисертаційної роботи Печенюка А.В. «Экспериментальное исследование ССП» ввійшов складовою частиною в звіт по науково-дослідній роботі, яка виконана в академії «Дослідження вдосконалених обводів для повного тихохідного судна за допомогою теоретичних та експериментальних методів», ОНМА, Одеса – 2015 р. (№ ДР 0115U005602, науковий керівник – к.т.н., доцент Давидов І.П.).

В розділі представлені результати, згідно до яких розроблені обводи носової частини забезпечують зниження буксирувального опору суден змішаного плавання. Результати базуються на теоретичних, експериментальних та чисельних дослідженнях.

Начальник науково-дослідної
частини ОНМА,
к.т.н., с.н.с., професор

В.Д. Савчук

Провідний фахівець
науково-дослідної частини ОНМА

О.О. Фірсанова

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор Одеської
національної морської академії
Д.Ю.Н., професор

О.М. Шемякін

2015 р.



А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи Печенюка А.В.
на тему «Метод оптимальної трансформації носової частини судна в
задачі зниження опору його руху» у навчальному процесі академії

Ми, що нижче підписались: начальник навчального відділу Пархоменко М.М., декан факультету морських перевезень та технологій к.т.н. доцент Ворохобін І.І. і завідуючий кафедрою «Теорія і устрій судна» к.т.н. доцент Бурмака І.О., склали цей акт у тому, що результати кандидатської дисертації здобувача Печенюка Андрія Володимировича на тему «Метод оптимальної трансформації носової частини судна в задачі зниження опору його руху» впроваджені у навчальний процес на кафедрі «Теорія і устрій судна» при викладанні курсу лекцій «Управління морехідними якостями суден», «Забезпечення морехідних якостей суден», студентам спеціальностей «Судноводіння», «Експлуатація суднових енергетичних установок», «Автоматизоване управління технологічними процесами». Використовуються основні принципи та підходи щодо зниження опору руху та вибору форми корпусу суден.

Начальник навчального відділу



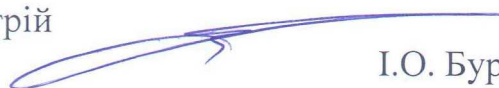
М.М. Пархоменко

Декан факультету морських перевезень
та технологій, к.т.н., доцент



І.І. Ворохобін

Завідуючий кафедрою «Теорія і устрій
судна», к.т.н., доцент



І.О. Бурмака



Акт

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Печенюка Андрея Владимировича
«Метод оптимальной трансформации формы носовой части судна в задаче снижения сопротивления его движению»

Моделирование обтекания корпуса судна в настоящее время является одной из наиболее актуальных задач, решаемых КБ судостроительной отрасли с помощью программного комплекса (ПК) FlowVision с целью получения буксировочных характеристик судна на этапе проектирования, гидродинамической отработки обводов, изучения условий работы судовых движителей.

В диссертационной работе Печенюка Андрея Владимировича разработана методика численного моделирования буксировки судна, которая внедрена в деятельность компании ТЕСИС в виде рекомендаций пользователям ПК FlowVision по решению соответствующих задач в их практической работе, а также рекомендаций нашим сотрудникам по тестированию новых версий ПК FlowVision и решению исследовательских задач в области гидродинамики судна.

Технический директор

ООО ТЕСИС,

к.ф.-м.н



А.А.Аксенов

	Морское Инженерное Бюро Marine Engineering Bureau ул. Тенистая, 15, г. Одесса, Украина, 65009 тел: +38 (048)2 347928, факс +38 (048)2 356005 E-mail: office@meb.com.ua 15, Tenistaya str., Odessa, Ukraine, 65009 Phone: +38 (048)2 347928, Fax +38 (048)2 356005 E-mail: office@meb.com.ua
---	---

Исх.№11/18 от 16.11.2015

**А К Т**

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Печенюка Андрея Владимировича
«Метод оптимальной трансформации носовой части судна в задаче снижения сопротивления его движению»

Проектирование теоретического корпуса и исследование ходкости играют важную роль в обеспечении надлежащих проектных показателей и мореходных качеств судна.

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Печенюка Андрея Владимировича:

- методика численного моделирования обтекания корпуса;
- метод оптимальной трансформации носовой части,

использовались для исследования ходовых качеств и проектирования формы корпуса в следующих проектах Морского Инженерного Бюро:

- сухогрузное судно-площадка проекта RSD54 – исследование ходовых качеств;
- многофункциональное судно ледового плавания мощностью 6 МВт для круглогодичного обслуживания нефтегазодобывающих платформ на Каспийском море проекта MPSV11 – проектирование формы корпуса и исследование ходовых качеств;
- многофункциональное мелкосидящее судно ледового плавания мощностью 6 МВт для круглогодичного обслуживания нефтегазодобывающих платформ на Каспийском море проекта TSV10 – проектирование формы корпуса и исследование ходовых качеств;
- многофункциональный мелкосидящий буксир-спасатель арктического плавания класса Arc 5 проекта MPSV12 – проектирование формы корпуса и исследование ходовых качеств;
- круизный пассажирский дизель-электроход смешанного река-море плавания типа «Танаис» проекта PV09 – проектирование формы корпуса и исследование ходовых качеств;
- автомобильно-железнодорожный паром и автомобильно-железнодорожный/пассажирский паром с возможностью перевозки опасных грузов с ледовой категорией Arc5 проектов CNF11C и CNF11CPD – исследование ходовых качеств.

Первый заместитель генерального директора,



И.А. Ильницкий



ООО «Диджитал Марин Текнолоджи»
 пер. Аркадиевский, д. 4
 г. Одесса, Украина, 65062
 тел/факс +380 (48) 777-8227
 e-mail: office@digitalmarine.net
<http://www.digitalmarine.net>
<http://www.fleeteco.com>

№ 01/11-15
 13.11.2015 г.

"УТВЕРЖДАЮ"



Директор ООО "ДМТ"

Б.Н. Станков

«В» ноября 2015 г.

А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Печенюка А.В. на тему: «Метод оптимальной трансформации носовой части судна в задаче снижения сопротивления его движению» в рабочий процесс компании

Настоящий акт составлен о том, что результаты кандидатской диссертации соискателя Печенюка Андрея Владимировича на тему: «Метод оптимальной трансформации носовой части судна в задаче снижения сопротивления его движению» внедрены в рабочий процесс компании в отделе вычислительной гидродинамики.

Судовые обводы занимают центральное место в пропульсивном комплексе судна, во многом определяют его мореходные качества, технико-эксплуатационные и экономические показатели, формируют внешний облик. Повышение проектных показателей за счет разработки более эффективных обводов является одной из важнейших задач гидродинамики судна.

Разработанный в диссертационной работе Печенюка Андрея Владимировича новый метод оптимальной трансформации носовой части судна позволяет проектировать носовые обводы на систематической основе и прогнозировать достижимую величину снижения сопротивления. Комплексное использование метода осуществляется в задачах проектирования теоретических корпусов новых и модернизируемых судов. Компоненты метода также применяются в следующих задачах:

- Методика численного моделирования обтекания корпуса судна используется для определения буксировочного сопротивления в рамках исследований ходовых качеств судов с помощью программного комплекса FlowVision;
- Модель систематических трансформаций формы корпуса используется для подготовки виртуальных 3D моделей в графической САПР T-Flex.

Ведущий инженер отдела
вычислительной гидродинамики



Томашевский И.В.