

На правах рукописи



Най Мьо Хлаинг

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ БАРЖЕ-БУКСИРНОГО
КОМПЛЕКСА ДЛЯ РЕСПУБЛИКИ СОЮЗ МЬЯНМА**

Специальность: 2.5.18. (05.08.03) - Проектирование и конструкция судов

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Санкт-Петербург
2021**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» на кафедре проектирования судов.

Научный руководитель: **Апалько Татьяна Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования судов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет».

Официальные оппоненты:

- **Иванова Владимира Павловича**, доктора технических наук, доцент, профессор кафедры «Кораблестроение», ФГБУ ВО «Калининградский государственный технический университет»;
- **Бойко Максима Сергеевича**, кандидата технических наук, руководителя отдела Российского Морского Регистра Судоходства.

Ведущая организация:

АО «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота» (ЦНИИМФ), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «27» января 2022 г. в 16:00 по адресу: на заседании диссертационного совета Д 212.228.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ) по адресу: 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, Актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте СПбГМТУ (<http://www.smtu.ru/>) в разделе «Наука».

Отзыв на автореферат просим направлять в двух экземплярах, заверенных печатью по адресу: по почте – 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, СПбГМТУ (отдел учёного секретаря).

На отзывах просим указывать: ФИО (полностью), ученая степень, должность, почтовый адрес, телефон, e-mail.

Автореферат разослан « 06 » декабря 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.228.01
кандидат технических наук



Д.А. Пономарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Республика Союз Мьянма является развивающейся страной, большое экономическое значение для которой имеет соответствующая инфраструктура, в том числе связанная с перевозками водным транспортом.

Транспортный сектор Республики Союз Мьянма состоит из шести подсекторов: автомобильных дорог, железных дорог, внутренних водных путей, портов, гражданской авиации и городского транспорта. Дороги теряют свою эффективность в период дождей. С учетом особенностей климата Республики Союз Мьянма единственным надёжным транспортом остаётся водный, который может круглогодично обработать грузы. С тех пор как в 1997 году Республика Союз Мьянма стала членом ассоциации АСЕАН, международная торговля постоянно развивается, особенно посредством морского транспорта. Однако доставка грузов в морские порты страны связана с использованием внутренних водных путей. Поэтому внутренние водные пути являются наиболее важным элементом бизнеса для Республики Союз Мьянма.

Использование барже-буксирного комплекса (ББК) как наиболее подходящего вида внутреннего грузового водного транспорта для Республики Союз Мьянма заключается в том, что в порту очень маленькие глубины в сухой сезон, другие суда не очень подходят для разгрузки и погрузки, поэтому рекомендуемые ББК можно использовать круглогодично. Также использование буксира-толкача в прибрежных районах по мореходным качествам невозможно и не может быть использован как буксир-кантовщик в акваториях портов и поэтому, в диссертации используется буксир традиционного типа.

В диссертации исследуются особенности барже-буксирного комплекса как объекта оптимизации. Описана математическая модель барже-буксирного комплекса, отображающая ББК как сложную техническую систему. В рамках модели приведены математические зависимости и алгоритмы для определения элементов ББК – грузовой баржи и буксира – теоретических чертежей, сопротивления воды, мощности главных двигателей и характеристики гребного винта буксирного судна, для решения вопросов общего расположения с учетом длин основных отсеков буксира, для расчета нагрузки и остойчивости. На базе метода случайного поиска создан алгоритм оптимизации элементов барже-буксирного комплекса, решающий задачу математического программирования с назначением функции критерия и функциональных ограничений. Математическая модель и алгоритм оптимизации реализованы в виде программы для обеспечения компьютерного эксперимента. Программа, реализующая математическую модель проектирования ББК, состоит из отдельных программных модулей, что облегчает ее совершенствование в анализе результатов решения задачи. Указанные программы могут быть использованы в исследовательском проектировании на начальных стадиях проектирования ББК.

Целью диссертационной работы являются разработка теоретических основ методики повышения экономической эффективности ББК перевозок для условий внутреннего водного транспорта Республики Союз Мьянма.

Объектами исследований в диссертации являются конструктивные особенности барже-буксирных комплексов с учетом ограничений судового хода реки Иравади, выбора основных типов барже-буксирного комплекса, определения их характеристик и возможности адаптации комплекса под нужды развивающейся страны.

Для достижения поставленных целей в работе сформулированы и решены следующие задачи:

- Построение математической модели для обоснования концепции барже-буксирного комплекса с учётом особенности эксплуатации в условиях Республики Союз Мьянма.
- Создание и уточнение алгоритмов, формул, архитектурно конструктивного типа ББК для комплексной оценки эффективности применения барже-буксирного комплекса на стадии технико-экономического обоснования проекта в частности в условиях Республики Союз Мьянма.

- Проведение компьютерных экспериментов для исследования полученной математической модели и доказательство её адекватности на базе созданного пакета прикладных программ.
- Создание метода определения типов и характеристик судов и элементов барже-буксирного комплекса, наилучшим образом приспособленных к эксплуатации на выбранных линиях.

Методы исследования. Реализация обозначенных задач заключается в разработке теоретических положений, физических и математических моделей функционирования ББК, создании прикладного программного продукта и проведении ряда расчетных экспериментов. Теоретической и методологической основой диссертационного исследования являются в первую очередь основные методики и аппараты теории корабля и теории проектирования судов. В исследованиях технико-экономических показателей ББК использовались методы математической статистики, экономической теории и оптимизационных процедур.

Выполнен анализ технических характеристик судов-аналогов, документации IMO, а также данных по грузоперевозкам судоходных компаний. Создан программный комплекс в среде Delphi, использованный для обеспечения автоматизации оптимизирующих расчетов.

В решении поставленных задач учитывались рекомендации российских и зарубежных ученых, практических специалистов: В. В. Ашика, Л. М. Ногида, А. В. Бронникова, А. И. Гайковича, Б. В. Богданова, М. Г. Шмакова, К. А. Сорокина, Г. А. Алчуджана, В. Б. Жинкина, А. Н. Гуровича, А. А. Родионова, А. В. Букшева, О. В. Одеговой, Clark C. J., Hunter E., Giblon R. P., Tapscott R. I., Pickersgill T. C., Sharp I. D., Trunick R. P., Rynn H. S. и др.

Научная новизна и теоретическая значимость работы.

- Проведен анализ и выявлены тенденции развития барже-буксирных комплексов.
- Выполнен статистический анализ основных проектных характеристик построенных и эксплуатирующихся барже-буксирных комплексов в различных странах мира.
- Рассмотрена внешняя задача проектирования судов и основные эксплуатационные линии между портами Янгон и Мандалай, а также другие условия, влияющие на грузовой поток.
- Составлены уравнения вместимости для буксира с учетом длин и объемов основных помещений, а также требуемых площадей палуб.
- Выполнена аппроксимация результатов компьютерных экспериментов по определению буксировочной мощности баржи.
- Построена математическая модель обоснования концепции барже-буксирного комплекса с учётом особенностей эксплуатации в условиях Республики Союз Мьянма.
- Разработаны алгоритмы определения деталей архитектурно-конструктивного типа ББК для комплексной оценки эффективности применения барже-буксирного комплекса на стадии технико-экономического обоснования проекта в условиях Республики Союз Мьянма.
- Проведение компьютерных экспериментов для исследования полученной математической модели и получено доказательство её адекватности на базе созданного пакета прикладных программ.

На защиту выносятся следующие результаты:

- Математические модели проектирования барже-буксирного комплекса с учётом особенности эксплуатации в условиях Республики Союз Мьянма.
- Метод комплексной оценки эффективности применения барже-буксирного комплекса на стадии технико-экономического обоснования проекта в условиях развивающихся стран, в частности, в условиях Республики Союз Мьянма с учетом особенностей плавания на выбранных линиях.
- Метод определения типов и характеристик судов, элементов барже-буксирного комплекса, наилучшим образом приспособленных к эксплуатации на выбранных линиях.

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 3 печатные работы в журнале «Морские интеллектуальные технологии». Доля автора в 1-й работе составляет 60%, доля автора в 2-й работе составляет 70%, а доля автора в 3-ей работе составляет 70%.

Структура и объем работы. Работа состоит из перечня принятых обозначений и сокращений, введения, 5 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа

содержит 138 стр. текстовых материалов, 31 таблицы и 94 рисунка. В перечне литературы содержится 101 наименование. Объем приложений составляет 94 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении указаны актуальность, цель и задачи диссертационного исследования.

В первой главе приводятся результаты исследования географических и климатических особенностей Республики Союз Мьянма и анализируются данные по климату, портам и хозяйственной деятельности Республики Союз Мьянма, необходимые в качестве исходных данных для дальнейшей работы по определению характеристик барже-буксирного комплекса.

Основанным внутренним, водным, транспортным путем является реке Иравади. Особенностью работы барже-буксирного комплекса на реке Иравади является достаточно сложная навигационная обстановка, обусловленная зависимостью течения реки от морских приливов. Это обстоятельство учтено при разработке сценариев рейсов введением ограничений скорости. На рис.1 представлена карта основных портов между городами Янгон и Мандалай, а в табл. 1 указаны параметры судового хода. В табл. 2 представлено сравнение режимов перевозки грузов из порта Мандалай в порт Янгон сухопутным и водным транспортом.

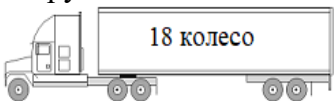
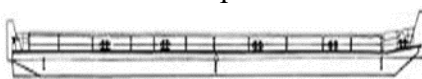


Рис.1. Карта основных портов между городами Янгон и Мандалай

Табл. 1. Параметры судового хода

Река	Иравади
Длина (км)	1534
Ширина (м)	400
Средняя скорость течения (км/ч)	7,8
Максимальная осадка судов в речных портах (м)	2
Габариты прохода буксира под мостами (м)	10,2

Табл. 2. Сравнение режимов перевозки грузов из порта Мандалай в порт Янгон сухопутным и водным транспортом.

	Автомобильные перевозки	Внутренние водные пути
Расстояние	750 км (450 миль)	917 км (570 миль)
Максимум скорость	65 км / час	Мандалай – Янгон (18 км / час) Янгон - Мандалай (11км / час)
Оценок стоимости доставки и количество транспортных объектов 500 т грузов	18 грузовых автомобилей  5300 \$	1 баржа  2250 \$
Время в пути	1,5-2 дней	7 дней (оценка)
Число дней в году	275 дней	320 дней

Основные виды грузов для перевозки буксирными составами на реке Иравади показана на рис. 2.

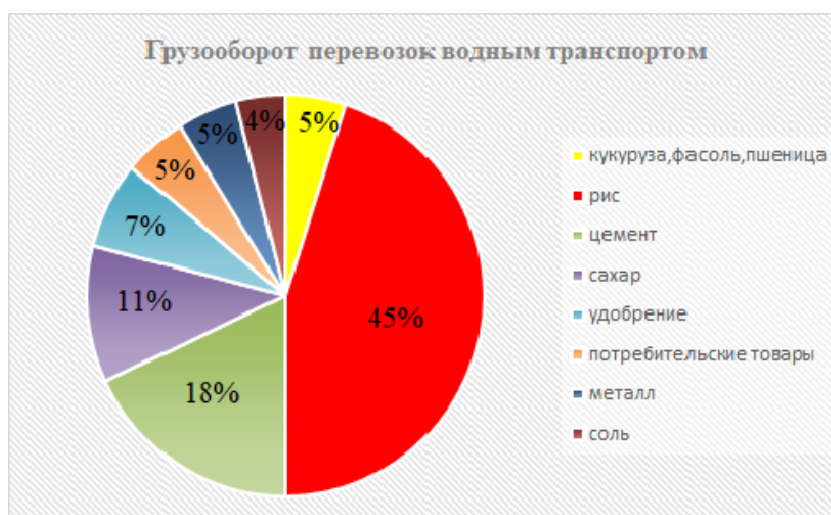


Рис.2. Виды грузов для перевозок буксирными составами на реке Иравади

Во второй главе рассматривается различная организация буксировки при использовании ББК, а также исследуются основные характеристики элементов барже-буксирных комплексов перспективных для Республики Союза Мьянма. С учетом географических особенностей внутренних водных путей Республики Союза Мьянма (Глава 1) в математической модели проектирования ББК в диссертации принята схема барже-буксирного комплекса, представленная на рисунке (рис.3). На участках с крутыми поворотами, сложными перекатами, неправильными течениями и другими препятствиями плоты ведут на укороченном буксирном тропе длиной 40—50 м.

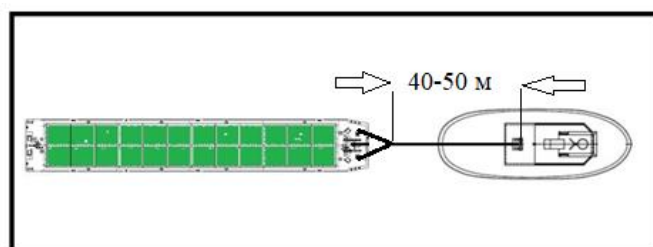


Рис. 3. Схема барже-буксирного комплексов для Республики Союза Мьянма

На начальной стадии проектирования, основные размеры барж, с учетом мирового опыта, могут быть получены из результатов статистических исследований, которые приведены на рис. (4),(5),(6),(7),(8).

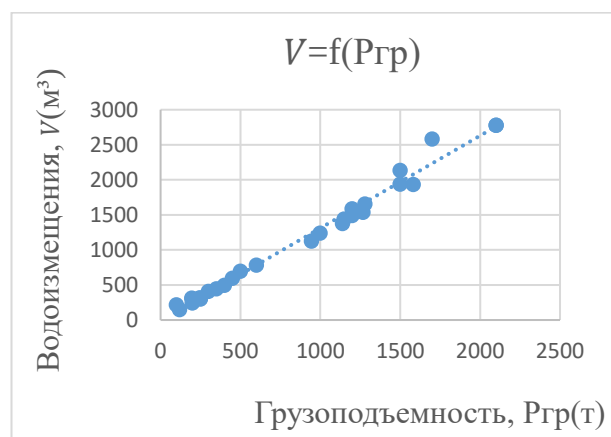


Рис. 4. Зависимость водоизмещения баржи от грузоподъемности

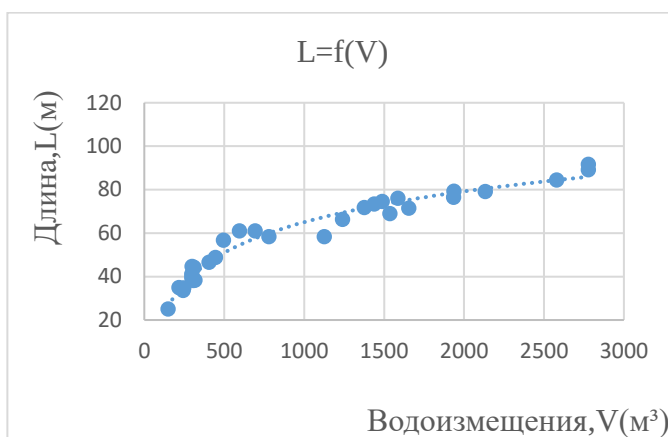


Рис. 5. Зависимость длины от водоизмещения баржи

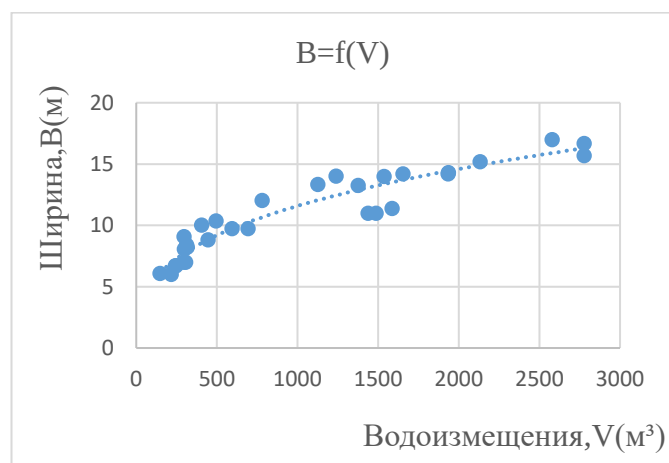


Рис.6. Зависимость ширины от водоизмещения баржи

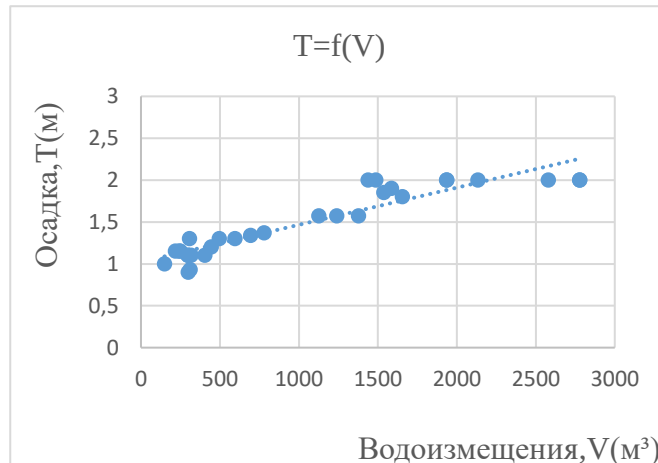


Рис.7. Зависимость осадки от водоизмещения баржи

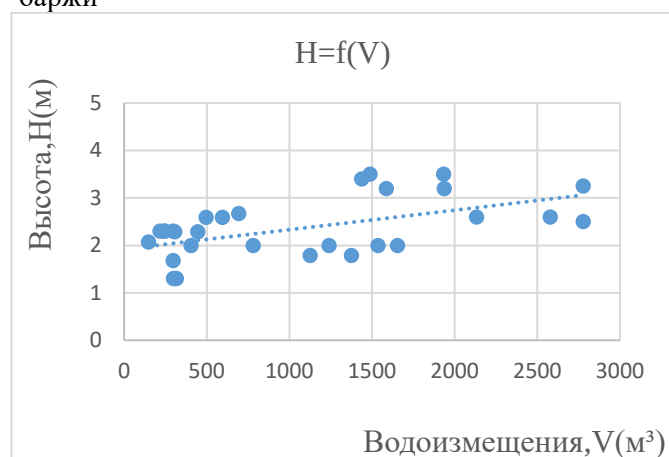


Рис. 8. Зависимость высоты борта от водоизмещения баржи

Аппроксимация представленных выборок позволила получить расчетные зависимости для определения основных характеристик буксируемой баржи:

$$V_{\text{бар}} = 1,3 * P_{\text{гр}} - 8,0, \text{ м}^3 \quad (1)$$

$$L_{\text{бар}} = 20,4 * \ln(V_{\text{бар}}) - 76,0, \text{ м} \quad (2)$$

$$B_{\text{бар}} = 1,15 * V_{\text{бар}}^{0,3341}, \text{ м} \quad (3)$$

$$T_{\text{бар}} = 0,0004 * V_{\text{бар}} + 1,02, \text{ м} \quad (4)$$

$$H_{\text{бар}} = 0,0004 * V_{\text{бар}} + 1,92, \text{ м} \quad (5)$$

где $V_{\text{бар}}$ – водоизмещения баржи; $L_{\text{бар}}$ – длина баржи ; $B_{\text{бар}}$ – ширина баржи; $T_{\text{бар}}$ – осадка баржи; $H_{\text{бар}}$ – высота борта баржи; $P_{\text{гр}}$ – грузоподъемность баржи.

Высокие коэффициенты детерминации ($R^2 = 0,91 \div 0,99$), соответствующие выборкам 1,2,3,4 и 5, свидетельствуют о тесной зависимости размерений барж от водоизмещения, что позволяет с достаточной степенью достоверности использовать полученные результаты в составе математической модели проектирования ББК.

Водоизмещение и главные размерения баржи, а также скорость буксировки определяют буксировочную мощность, требуемую для нахождения основных характеристик буксира.

Буксировочная мощность $EPS_{\text{бар}}$ для баржи при заданной для ББК скорости буксировки 15 км/час может быть определена с помощью эмпирической зависимости (6), представленной на рис.9.

$$EPS_{\text{бар}} = 0,172 * P_{\text{гр}} + 62,0 \pm 20,0, \text{ л.с.} \quad (6)$$

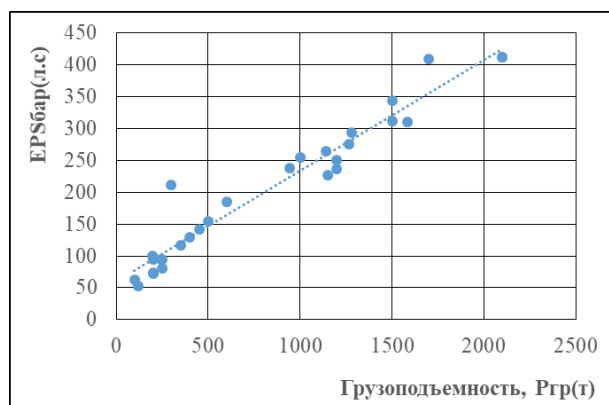


Рис. 9. Зависимость буксировочной мощности баржи от грузоподъемности.

Математическая модель определения основных характеристик баржи разработана для архитектурно-конструктивного типа несамоходных сухогрузных барж - баржи-площадки (рис.10) в виде блок-схемы на рис.11.

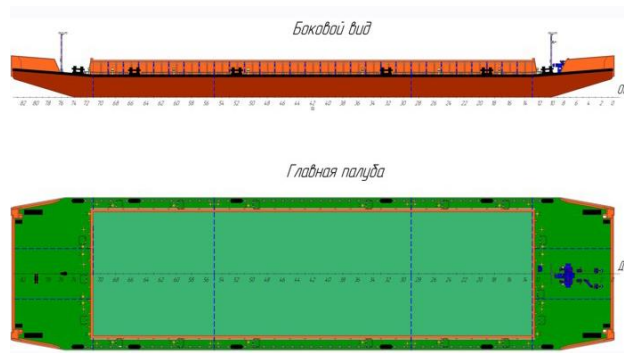


Рис.10. Несамоходная баржа-площадка

Одной из важнейших задач при создании проекта судна является разработка его компоновки, которая фиксируется в чертежах общего расположения. Компоновка судна в наибольшей степени влияет на его эффективность и выполнение функциональных требований к проекту.

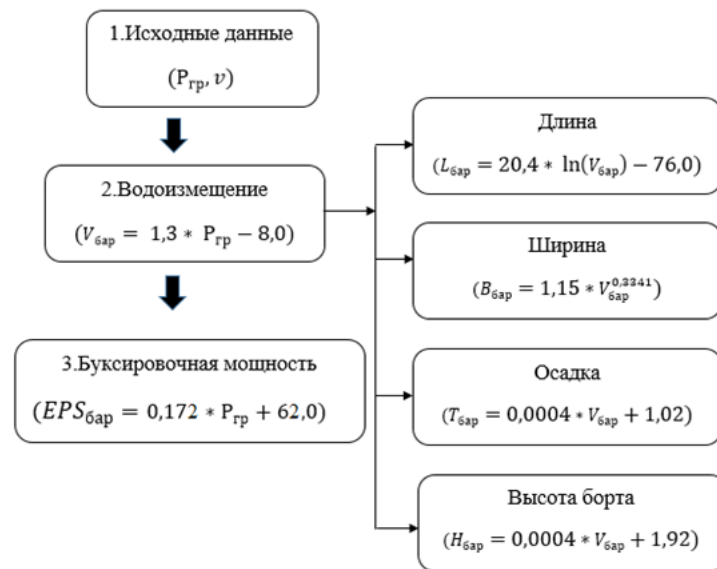


Рис.11. Блок-схема математической модели определения характеристик баржи

Для формирования концепции буксира для Республики Союз Мьянма исследовался архитектурно-конструктивный тип судов-аналогов. Выбранная схема общего расположения буксира представлена на рис. 12.

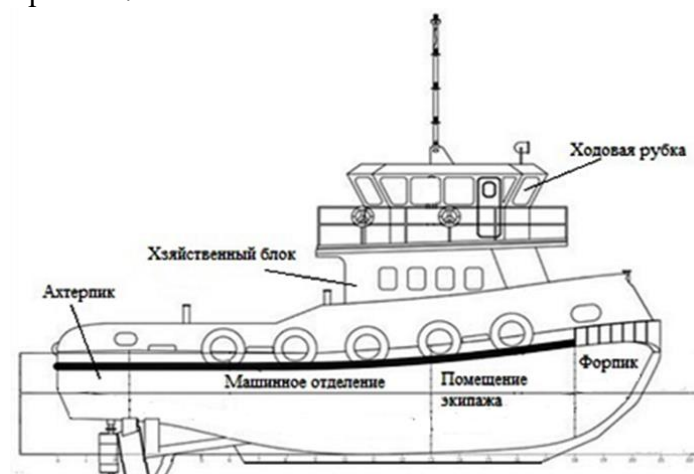


Рис.12. Схема общего расположения буксира для Республики Союз Мьянма.

На основании зафиксированного архитектурно-конструктивного типа буксира были получены эмпирические формулы, определяющие вместимость буксира (рис. 13).

Баланс вместимости буксира в объемах для задачи оптимизации будет иметь вид:

$$W_{\text{К РАСП}} \geq W_{\text{К ТР}} \quad (7)$$

$$W_{\text{НАД РАСП}} \geq W_{\text{НАД ТР}} \quad (8)$$

где $W_{\text{К РАСП}}$ – располагаемый объем в корпусе; $W_{\text{К ТР}}$ – требуемый объем в корпусе; $W_{\text{НАД РАСП}}$ – располагаемый объем в надстройке; $W_{\text{НАД ТР}}$ – требуемый объем в надстройке.

Располагаемый объем в корпусе определяется по соотношению:

$$W_{\text{К РСП}} = \delta * L * B * T * \left(\frac{H}{T}\right)^{\alpha/\delta} \quad (9)$$

где δ – коэффициент общей полноты; α – коэффициент полноты КВЛ; L – длина буксира по КВЛ; B – ширина буксира по КВЛ на миделе; T – осадка для полного водоизмещения; H – высота борта на миделе.

Требуемый объем в корпусе определяется суммой:

$$W_{K\text{ ТР}} = W_{\Phi\text{ ТР}} + W_{ЖП\text{ ТР}} + W_{МО\text{ ТР}} + W_{АХТ\text{ ТР}}, \text{ м}^3 \quad (10)$$

$$W_{НАД\text{ ТР}} = W_{ХБ\text{ ТР}} + W_{ХР\text{ ТР}}, \text{ м}^3 \quad (11)$$

где $W_{\Phi\text{ ТР}}$ – требуемый объем форпика; $W_{ЖП\text{ ТР}}$ – требуемый объем помещения экипажа; $W_{МО\text{ ТР}}$ – требуемый объем машинного отделения; $W_{АХТ\text{ ТР}}$ – требуемый объем ахтерпика; $W_{ХБ\text{ ТР}}$ – требуемый объем хозяйственный блок; $W_{ХР\text{ ТР}}$ – требуемый объем ходовая рубка.

Требуемые объемы определяются по результатам статистических исследований и рассматриваются ниже.

Эмпирические формулы для объемов помещений.

$$W_{\Phi\text{ ТР}} = 0,139 * L_{\text{бук}} * B_{\text{бук}} * H_{\text{бук}} - 1,2, \text{ м}^3 \quad (12)$$

$$W_{ЖП\text{ ТР}} = 0,249 * L_{\text{бук}} * B_{\text{бук}} * H_{\text{бук}} + 0,4, \text{ м}^3 \quad (13)$$

$$W_{МО\text{ ТР}} = 0,513 * L_{\text{бук}} * B_{\text{бук}} * H_{\text{бук}} - 4,7, \text{ м}^3 \quad (14)$$

$$W_{АХТ\text{ ТР}} = 0,1 * L_{\text{бук}} * B_{\text{бук}} * H_{\text{бук}} + 5,5, \text{ м}^3 \quad (15)$$

$$W_{ХБ\text{ ТР}} = 0,2 * L_{\text{бук}} * B_{\text{бук}} * H_{\text{бук}} + 30,8, \text{ м}^3 \quad (16)$$

$$W_{ХР\text{ ТР}} = 0,089 * L_{\text{бук}} * B_{\text{бук}} * H_{\text{бук}} + 29,5, \text{ м}^3 \quad (17)$$

$$W_{Р\text{ ТР}} = W_{K\text{ ТР}} + W_{НАД\text{ ТР}}, \text{ м}^3 \quad (18)$$

где $L_{\text{бук}}$ – длина буксира по КВЛ; $B_{\text{бук}}$ – ширина буксира; $H_{\text{бук}}$ – высота борта буксира. $W_{Р\text{ ТР}}$ – расчета требуемый объем буксира. Коэффициенты детерминации составили $R^2=0,92\div0,99$.

Баланс вместимости буксира в площадях для задачи оптимизации будет иметь вид:

$$S_{РП} = S_{ПАЛ\text{ ТР}} - (S_{\Phi\text{ ТР}} + S_{ЖП\text{ ТР}} + S_{НАД\text{ ТР}}) \quad (19)$$

$$S_{Р} \geq S_{Р\text{ ТР}} \quad (20)$$

где $S_{ПАЛ\text{ ТР}} = \alpha * L * B$ – общая располагаемая площадь верхней палубы;

$S_{НАД\text{ ТР}} = L_{НАД\text{ ТР}} * (0,96 * B)$ – требуемая площадь палубы под надстройкой;

$S_{РП}$ – фактическая площадь палубы под рабочей площадкой;

$S_{Р} = L_{ХР\text{ ТР}} * (0,92 * B)$ – располагаемая площадь рубки;

$S_{Р\text{ ТР}}$ – требуемая площадь рубки, определяемая статистически.

Эмпирические формулы для площадей помещений.

$$S_{\Phi\text{ ТР}} = 0,133 * L_{\text{бук}} * B_{\text{бук}} - 0,09, \text{ м}^2 \quad (21)$$

$$S_{ЖП\text{ ТР}} = 0,238 * L_{\text{бук}} * B_{\text{бук}} + 0,96, \text{ м}^2 \quad (22)$$

$$S_{МО\text{ ТР}} = 0,524 * L_{\text{бук}} * B_{\text{бук}} + 1,58, \text{ м}^2 \quad (23)$$

$$S_{АХТ\text{ ТР}} = 0,104 * L_{\text{бук}} * B_{\text{бук}} + 1,76, \text{ м}^2 \quad (24)$$

$$S_{K\text{ ТР}} = S_{\Phi\text{ ТР}} + S_{ЖП\text{ ТР}} + S_{МО\text{ ТР}} + S_{АХТ\text{ ТР}}, \text{ м}^2 \quad (25)$$

$$S_{ХБ\text{ ТР}} = 0,32 * L_{\text{бук}} * B_{\text{бук}} + 3,14, \text{ м}^2 \quad (26)$$

$$S_{ХР\text{ ТР}} = 0,115 * L_{\text{бук}} * B_{\text{бук}} + 9,41, \text{ м}^2 \quad (27)$$

$$S_{НАД\text{ ТР}} = S_{ХБ\text{ ТР}} + S_{ХР\text{ ТР}}, \text{ м}^2 \quad (28)$$

$$S_{Р\text{ ТР}} = S_{K\text{ ТР}} + S_{НАД\text{ ТР}}, \text{ м}^2 \quad (29)$$

где $S_{K\text{ ТР}}$ – требуемая площадь корпуса буксира; $S_{НАД\text{ ТР}}$ – требуемая площадь надстройки буксира; $S_{\Phi\text{ ТР}}$ – требуемая площадь форпика; $S_{МО\text{ ТР}}$ – требуемая площадь машинного отделения; $S_{АХТ\text{ ТР}}$ – требуемая площадь ахтерпика; $S_{Р\text{ ТР}}$ – расчета требуемая площадь буксира; $S_{ЖП\text{ ТР}}$ – требуемая площадь жилые помещения; $S_{ХБ\text{ ТР}}$ – требуемая площадь хозяйственный блок; $S_{ХР\text{ ТР}}$ – требуемая площадь ходовая рубка. Коэффициенты детерминации составили $R^2=0,93\div0,98$.

Баланс вместимости буксира в габаритах длин для задачи оптимизации будет иметь вид:

$$L \geq L_{\Phi\text{ ТР}} + L_{ЖП\text{ ТР}} + L_{МО\text{ ТР}} + L_{АХТ\text{ ТР}} \quad (30)$$

где L – длина буксира по КВЛ; $L_{\text{ФТР}}$ – требуемая длина форпика; $L_{\text{ЖПТР}}$ – требуемая длина помещения экипажа; $L_{\text{МОТР}}$ – требуемая длина машинного отделения; $L_{\text{АХТР}}$ – требуемая длина ахтерпика.

Эмпирические формулы для определения габаритов помещений буксира.

$$L_{\text{ФТР}} = 0,132 * L_{\text{бук}} - 0,01, \text{ м} \quad (31)$$

$$L_{\text{ЖПТР}} = 0,231 * L_{\text{бук}} + 0,3, \text{ м} \quad (32)$$

$$L_{\text{МОТР}} = 0,545 * L_{\text{бук}} - 0,8, \text{ м} \quad (33)$$

$$L_{\text{АХТР}} = 0,091 * L_{\text{бук}} + 0,5, \text{ м} \quad (34)$$

$$L_{\text{КТР}} = L_{\text{ФТР}} + L_{\text{ЖПТР}} + L_{\text{МОТР}} + L_{\text{АХТР}}, \text{ м} \quad (35)$$

$$L_{\text{ХБТР}} = 0,26 * L_{\text{бук}} + 1,9, \text{ м} \quad (36)$$

$$L_{\text{ХРТР}} = 0,05 * L_{\text{бук}} + 2,7, \text{ м} \quad (37)$$

$$L_{\text{НАДТР}} = L_{\text{ХБТР}} + L_{\text{ХРТР}}, \text{ м} \quad (38)$$

$$L_{\text{РТР}} = L_{\text{КТР}} + L_{\text{НАДТР}}, \text{ м} \quad (39)$$

где $L_{\text{КТР}}$ – требуемая длина корпуса буксира; $L_{\text{НАДТР}}$ – требуемая длина надстройка буксира; $L_{\text{ФТР}}$ – требуемая длина форпика; $L_{\text{МОТР}}$ – требуемая длина машинного отделения; $L_{\text{АХТР}}$ – требуемая длина ахтерпика; $L_{\text{РТР}}$ – расчетная требуемая длина буксира; $L_{\text{ЖПТР}}$ – требуемая длина жилые помещения; $L_{\text{ХБТР}}$ – требуемая длина хозяйственный блок; $L_{\text{ХРТР}}$ – требуемая длина ходовая рубка.

Коэффициенты детерминации составили $R^2=0,9\div0,91$.

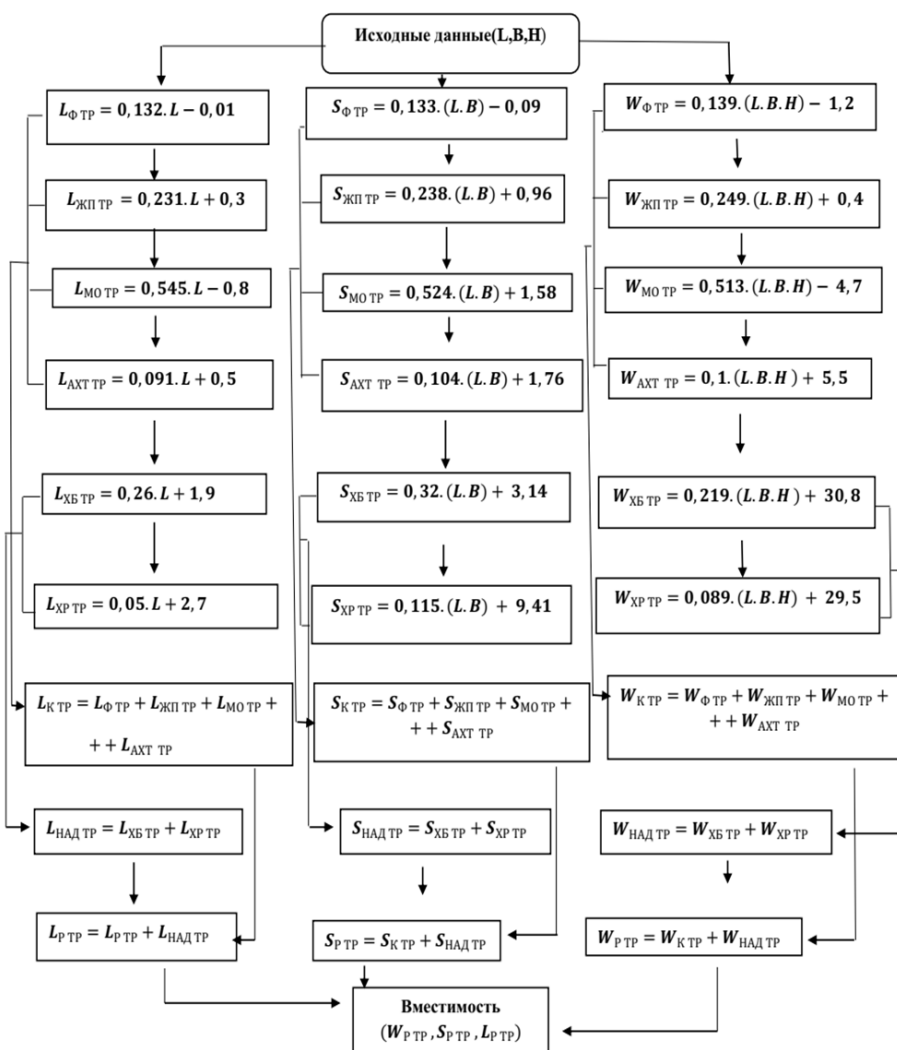


Рис.13. Блок-схема расчета вместимости буксира для Республики Союз Мьянма.

На начальных стадиях проектирования требуемая тяга буксира Z может быть определена через буксировочную мощность буксируемой баржи с помощью эмпирической формулы (40)

$$Z = 18,225 * EPS_{бар} + 4519, \text{ кг} \quad (40)$$

В свою очередь, мощность судовой энергетической установки буксира на начальной стадии проектирования можно получить с помощью эмпирической формулы

$$N = 0,1372 * Z, \text{ л.с.} \quad (41)$$

где Z – тяга буксира; N – мощность буксира.

Для расчета водоизмещение буксира (D) используется уравнение нагрузки в виде:

$$D = P_k + P_c + P_{эу} + P_{эл} + P_v + P_{зч} + P_{ин.сн} + P_{жг} + P_{зв} + P_t + P_{эк} \quad (42)$$

где P_k – масса корпуса; P_c – масса систем; $P_{эу}$ – масса энергетической установки; $P_{эл}$ – масса электрооборудования; P_v – масса вооружения навигационного; $P_{зч}$ – масса запасных частей; $P_{ин.сн}$ – масса запаса водоизмещения; $P_{жг}$ – масса постоянных жидких грузов; $P_{зв}$ – масса инвентарного снабжения; P_t – масса топлива, смазочного масла и котельной воды; $P_{эк}$ – масса экипажа, провизии и пресной воды.

Была проведена оценка остойчивости буксира с учётом эксплуатационных случаев.

Расчет строительной стоимости судна является одним из основных этапов обоснования проекта. В условиях рыночной экономики определение цены судна является сложной задачей. Определение контрактной цены судна на начальных стадиях проектирования может быть произведено только с большими погрешностями. Однако цена судна на этих стадиях выступает как инструмент при сопоставлении различных вариантов проекта. Поэтому результат стоимостных расчетов не столько важен количественно, сколько качественно.

В данной работе критерием эффективности барже-буксирного комплекса транспортной системы являются относительные приведенные затраты. При этом исходные данные, для описания функционирования элементов ББК, нельзя получить непосредственно аналитически, поскольку они носят случайный характер. В данном исследовании используются значения математических ожиданий элементов технического задания.

Годовая провозоспособность барже-буксирного комплекса, т.

$$A = (\epsilon_{гр}^{BB} + \epsilon_{гр}^{BH}) P_{гр} n \quad (43)$$

где

$\epsilon_{гр}^{BB}$ – коэффициент использования грузоподъемности барже-буксирного комплекса при ходе вверх по течению;

$\epsilon_{гр}^{BH}$ – коэффициент использования грузоподъемности барже-буксирного комплекса при ходе вниз по течению;

n – число оборотов барже-буксирного комплекса за навигацию.

$P_{гр}$ – грузоподъемность баржи, т.

Годовые эксплуатационные расходы по барже-буксирному комплексу с буксиром, \$.

$$\mathcal{E} = 0,074 C_{бар} + 3,52 n_{эк} + 0,074 C_{бук} + 1,19 \mathcal{E}_{т.с.} \quad (44)$$

где

$n_{эк}$ – численность экипажа буксира;

$C_{\text{бар}}$ – стоимость постройки баржи, \$;

$C_{\text{бук}}$ – стоимость постройки буксира, \$;

$\text{Э}_{\text{т.с.}}$ – расходы (на один состав) на топливо за навигацию, \$.

Относительные приведенные затраты по строительству и эксплуатации барже-буксирного комплекса, \$ / т.

$$ZZ = \frac{0.15(C_{\text{бук}} + C_{\text{бар}}) + \text{Э}}{A} \quad (45)$$

В данном расчете определение главных размерений судов проводится путем минимизации критерия эффективности, которым являются относительные приведенные затраты.

Общая схема расчетов в математической модели проектирования ББК показаны на рис.14.

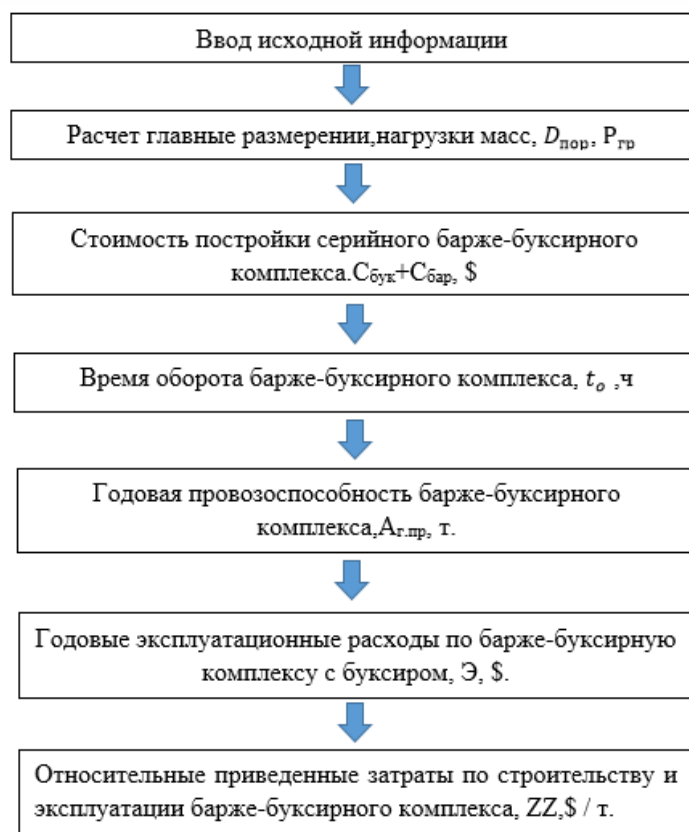


Рис.14. Блок-схема для расчета технико-экономических показателей барже-буксирного комплекса на заданной линии.

В табл.3 приведены результаты оптимизации характеристики ББК для различных маршрутов.

Таблица 3. Результаты оптимизации характеристики ББК для различных маршрутов

Маршрут	Характеристики баржи						Характеристики буксир					
	L(м)	B(м)	T(м)	H(м)	δ	D(т)	L(м)	B(м)	T(м)	H(м)	δ	D(т)
Янгон- Хинтада	58,8	7,0	1,9	3,0	0,74	602	23,3	4,5	1,5	2,3	0,47	76
Янгон- Пьи	59,8	9,1	1,2	2,7	0,95	642	21,6	5,7	1,3	2,7	0,47	79
Хинтада - Пакхоуку	54,6	8,6	1,6	2,7	0,82	617	19,7	5,7	1,4	2,3	0,46	73
Мандалай- Пьи	54,6	8,6	1,6	2,7	0,82	617	19,7	5,7	1,4	2,3	0,46	73
Янгон- Мандалай	51,5	8,3	1,5	3,3	0,93	609	22,1	4,7	1,5	2,3	0,47	73

Таблица 4. Результаты оптимизации и погрешности ББК для различных маршрутов

Маршрут	Расстояние между портами, L(км)	Водоизмещение ББК, $D_{opt}(т)$	Погрешность $(D_{opt} - D_{opt.сред}), \%$
Янгон - Хинтада	220	678	2%
Янгон - Пьи	385	721	4%
Хинтада - Пакхоуку	520	690	0%
Мандалай - Пьи	527	690	0%
Янгон - Мандалай	912	682	1%

Из таблицы 4 видно, что погрешность оптимизации по водоизмещению ББК на пятом маршруте составляет максимум 4 % следовательно, все полученные ББК можно использовать в любых маршрутов.

В третьей главе рассматривается оптимизация основных характеристик барже-буксирного комплекса. В практике исследовательского проектирования судов главное внимание обращается на обоснование оптимальных характеристик. Так, оптимизация характеристик судов при создании флота ББК связана с необходимостью рассмотрения различных вариантов решения общей народнохозяйственной задачи, т.е. обеспечения импортно-экспортной торговли через транспортный узел, состоящий из морского, железнодорожного и автомобильного транспорта. Задача оптимизации основных характеристик барже-буксирного комплекса сформулирована следующим образом:

$$\begin{aligned}
 &C(c_1, \dots, c_p); \\
 &X(x_1, \dots, x_n); \\
 &(x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, \quad i=1, \dots, n; \\
 &G_j(X, C) \geq A_j(C), \quad j=1, \dots, m; \\
 &G_j(X, C) = A_j(C), \quad j=m, \dots, M; \\
 &\text{extr } Z(X, C),
 \end{aligned}$$

где C – вектор технического задания, элементы которого представляют собой количественные и качественные требования к задаче; X – вектор оптимизируемых переменных (синтезируемых компонентов) задачи, содержащий n непрерывных компонентов. Требования к задаче формулируются в виде совокупности равенств, неравенств и логических условий. Характеристики синтезируемой задачи описывается функциям G_j , а требования к характеристикам – соответственно функциям A_j .

Для глобальной оценки соответствия качеств синтезируемой задачи целям ее создания применяется критерий эффективности (функция цели) ZZ , монотонно связанный с такой оценкой. Наилучшей считается задача, для которой критерий достигает экстремального значения (минимума или максимума в зависимости от физической природы критерия).

В четвертой главе описана программная реализация математической модели оптимизации параметров барже-буксирного комплекса.

Оптимизируемые параметры ББК (с учётом ограничений) являются:

- Коэффициент общей полноты баржи ($0,72 \leq \delta_{бар} \leq 0,96$);
- Длина баржи ($24 \leq L_{бар} \leq 60$), м;
- Ширина баржи ($6 \leq B_{бар} \leq 17$), м;
- Осадка баржи ($0,9 \leq T_{бар} \leq 2$), м;
- Высота борта баржи ($1,3 \leq H_{бар} \leq 3,5$), м;
- Коэффициент общей полноты буксира ($0,45 \leq \delta_{бук} \leq 0,58$);

- Длина буксира ($12 \leq L_{\text{бук}} \leq 25,01$), м;
- Ширина буксира ($4,2 \leq B_{\text{бук}} \leq 8$), м;
- Осадка буксира ($1,2 \leq T_{\text{бук}} \leq 2$), м;
- Высота борта буксира ($1,9 \leq H_{\text{бук}} \leq 2,99$), м.

Ограничения нарушений оптимизации задаются по следующим параметрам:

1. Требование по полезной грузоподъемности баржи

$$D - \sum_i G_i \geq G_{\text{гр}} ; \quad (46)$$

2. Требование к остойчивости баржи

Значение максимального плеча диаграммы статической остойчивости l_{max} должно быть не меньше:

$$l_{\text{max}} \geq 0,2 \text{ м}; \quad (47)$$

3. Требование по полезной нагрузке буксира

$$D = \sum G_i ; \quad (48)$$

4. Требование к остойчивости буксира

$$K_1 \geq 1; \quad (49)$$

5. Требование по вместимости буксира

$$W_{\text{расчет}} \geq W_{\text{требуем}} ; \quad (50)$$

6. Требование по относительным приведенным затратам комплекса

$$ZZ = \frac{0.15(C_{\text{бук}} + C_{\text{бар}}) + \Theta}{A} \quad (51)$$

Для решения задачи оптимизации используется алгоритм случайного поиска. Интерфейс этого модуля программного комплекса показан на рис. 15.

Интерфейсы некоторых модулей комплекса показаны на рис. 15 – 18 .

АЛГОРИТМ СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА

ОПТИМИЗИРУЕМЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

	MIN	НАЧАЛЬНОЕ	MAX
Коэффициент общей полноты баржи	0,72	0,84	0,96
Длина баржи, м	24	57,5	60
Ширина баржи, м	6	11,5	17
Осадка баржи, м	0,9	1,45	2
Высота борта баржи, м	2,1	2,8	3,5
Коэффициент общей полноты буксир	0,45	0,51	0,58
Длина буксира, м	12	18,5	25
Ширина буксира, м	4,2	6,1	8
Осадка буксира, м	1,3	1,65	2
Высота борта буксира, м	2,1	2,5	2,99

Исходная информация к алгоритму

Число ограничений (неравенств)

Число непрерывных переменных

Успех алгоритма случайного поиска ●

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Коэффициент общей полноты баржи	0,84	Коэффициент общей полноты буксир	0,51
Длина баржи, м	57,50	Длина буксира, м	18,50
Ширина баржи, м	11,50	Ширина буксира, м	6,10
Осадка баржи, м	1,45	Осадка буксира, м	1,65
Высота борта баржи, м	2,80	Высота борта буксира, м	2,50
Критерий эффективности	18		
№ лучшего цикла	11000		

СТАТИСТИКА НАРУШЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Нагрузка баржи	2710	Вместимость буксир4	0
Нагрузка буксир	1769	Вместимость буксир5	3
Остойчивость буксир	1413	Вместимость буксир6	0
Вместимость буксир1	0		
Вместимость буксир2	0		
Вместимость буксир3	40	Всего циклов оптимизации	11000

Вернуться
ОПТИМИЗИРОВАТЬ
Расчет варианта
Печать результатов
К информации по проекту

Рис. 15. Информационный модуль оптимизации



Рис. 16. Экран выбора действий для просматривания информации по проекту (баржа)



Рис. 16. Экран выбора действий для просматривания информации по проекту (буксир)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ЭНЕРГИИ

Выбрать фирму
1. CATERPILLAR
2. WEICHAI
3. MTU
4. WARTSILA

Фирма: CATERPILLAR

	N-max(KW)	N-max(HP)	L(mm)	B(mm)	H(mm)	RPM	Число цилиндров	W(kg)	Топливо(г/квт-ч)	Масло(г/квт-ч)	VилиL	Тип топлива
3406C	298,00	405,00	1454,00	913,50	1278,50	1800,00	6,00	1325,00	208,00		In-Line	Diesel
C9.3	355,00	483,00	1452,00	978,00	1093,00	2300,00	6,00	1122,00	222,30		In-Line	Diesel
C7.1	373,00	507,00	1095,00	798,00	876,00	2900,00	6,00	760,00	232,00		In-Line	Diesel
C8.7	478,00	650,00	1218,00	881,00	984,00	2300,00	6,00	1089,00	217,00		In-Line	Diesel
C12	526,00	715,00	1574,00	969,00	1005,00	2300,00	6,00	1174,00	220,30		In-Line	Diesel
C12.9	735,00	999,00	1463,00	1110,00	1085,00	2300,00	6,00	1672,00	218,90		In-Line	Diesel
3508C	820,00	1115,00	2117,00	1703,00	1829,00	1600,00	8,00	4960,00	210,10		V	Diesel
C12.9	847,00	1152,00	1931,00	1204,00	1300,00	2300,00	6,00	1950,00	219,80		In-Line	Diesel

Выбор

C12.9

735	999	1463	1110	1085	2300	6	1672	218.9			In-Line	Diesel
-----	-----	------	------	------	------	---	------	-------	--	--	---------	--------

Рис. 18.Экран подбора главного двигателя для буксира

Главный двигатель для ББК выбирается из каталога дизелей фирмы (MTU, CATERPILLAR, WEICHAI, WARTSILA).

В состав информационного модуля включены:

- входная информация, в которой используются техническое задание на проектирование ББК, задание алгоритма оптимизации, включающая в себя указание оптимизируемых характеристик и критерий эффективности и др.;
- информация, содержащаяся в методиках расчетов качеств ББК, проектируемого судна и его подсистем;
- нормативно-справочная информация, в которой заключаются базовые теоретические чертежи, их кривые для расчета коэффициента остаточного сопротивления, каталог дизелей фирмы (MTU, CATERPILLAR, WEICHAI, WARTSILA);
- выходная информация, как для отдельных программных модулей, так и для комплекса в целом.

Программный комплекс состоит из отдельных функциональных модулей, которые образуют математическую модель барже-буксирного комплекса. В первую очередь рассматривается вектор оптимизируемых переменных для определения начальных значений и некоторых вспомогательных величин, для которых применяется схема структурного имитационного программно-методического комплекса, показанного на рис. 19.

Исходными данными этой схемы является:

- Грузоподъемность баржи, т;
- Дальность плавания ББК, мили;
- Автономность по провизии, сут;
- Численность экипажа, чел;
- Скорость судна эксплуатационная, узлы;
- Продолжительность навигационного периода, сут;
- Пробег барже-буксирного комплекса с грузом вверх по течению, км;
- Пробег барже-буксирного комплекса с грузом вниз по течению, км;
- Пробег порожнего барже-буксирного комплекса вверх по течению, км;
- Пробег порожнего барже-буксирного комплекса вниз по течению, км;
- Среднее приращение скорости при ходе барже-буксирного комплекса вниз по течению, узлы;
- Средняя потеря скорости при движении вверх по течению, узлы;

- Коэффициент использования грузоподъемности барже-буксирного комплекса при ходе вверх по течению;
- Коэффициент использования грузоподъемности барже-буксирного комплекса при ходе вниз по течению;
- Среднеарифметическая по двум пунктам отправления часовая партионность отправки груза, т/ч;
- Высоты точки подвеса гака, м;
- Число пунктов погрузки-выгрузки на линии, $n_{п}$.



Рис. 19. Схема структуры имитационного программно-методического модуля барже-буксирного комплекса.

В пятой главе проверяется адекватность математической модели, используемой при решении оптимизационной задачи, чтобы полученные результаты имели практическое значение. В научной и инженерной практике мерой адекватности выступает точность, характеризующая сходство между информацией, получаемой в математической модели с реальной системой.

Таблица 5. Проекты буксиров, выбранных для оценки адекватности математической модели

№ в базе данных	Страна	Тип	прототипы				проект			
			Vs	R	A	п _{эк}	Vs	R	A	п _{эк}
3	Греция	11139	10	500	7	4	8	500	7	4
6	ОАЭ	ALS10	10	500	7	4	8	500	7	4
11	Турция	Tug 178	11	500	7	4	8	500	7	4

Результаты оценки адекватности математической модели представлены в таблице 6.

Таблица 6. Результаты оценки адекватности математической модели буксира

Тип	Д _{бук,Т}		L _{бук,М}		В _{бук,М}		Н _{бук,М}		Т _{бук,М}		δ		N,л.с	
	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет
11139	165	147	24,4	22,5	7,78	7,5	2,8	2,4	1,8	1,89	0,46	0,46	296	294
14162	163	130	22	24,3	7,7	7,0	2,7	2,3	2,0	1,5	0,5	0,52	301	289
ALS10	148	125	21,89	22,2	6,23	5,8	2,82	2,67	2,0	1,75	0,53	0,52	323	318

Д_{бук} – полное водоизмещение буксир; L_{бук}, В_{бук}, Т_{бук}, Н_{бук}, δ – длина по КВЛ, ширина, осадка, высота борта, коэффициент общей полноты буксир; N – мощность главных двигателей.

Из анализа сравнения характеристик реальных судов и результатов характеристик проекта буксира, можно сказать, что проектные характеристики буксира, полученных решением оптимизационной задачи по прикладной программе очень близки друг к другу. Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанная математическая модель ББК имеет достаточно высокую степень адекватности.

Адекватность математической модели подтверждается также данными рисунка 20, на котором точками показаны относительные приведенные затраты ББК, подсчитанные для реальных барж, характеристики которых приведены в таблице 7.

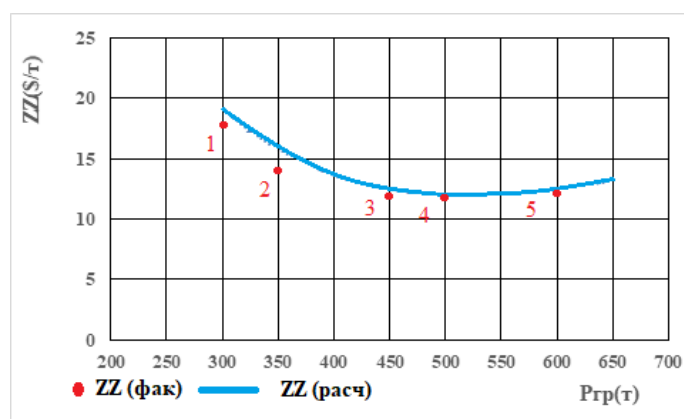


Рис 20. Относительные приведенные затраты фактического судна ZZ (фак) и оптимального расчетного варианта ZZ (расч).

Таблица 7. Сопоставление относительных приведенных затрат фактического судна ZZ(фак) и оптимального расчетного варианта ZZ (расч).

№	Название судна	L (м)	B (м)	T (м)	H (м)	δ	Р _{гр} (т)	D _{бар} (т)	ZZ (фак) (\$/т)	ZZ (расч) (\$/т)
1	944	46,5	10,04	1,1	2,0	0,7901	300	409	17	19
2	Bagone-600	48,77	8,84	1,2	2,29	0,8629	350	450	14	16
3	Bagone-3000	60,0	9,75	1,3	2,59	0,7704	450	600	12	12
4	Tha	60,0	9,75	1,34	2,67	0,8719	500	700	12	12
5	943	58,35	12,03	1,37	2	0,8119	600	787	12	13

Степень чувствительности относительных приведенных затрат характеризуется изменением их значений и выполнением всех функциональных ограничений при отступлении оптимизируемых элементов от значений, соответствующих оптимуму. Достаточная чувствительность разработанной математической модели подтверждается примером численного

эксперимента (рис.21). При изменении задаваемой грузоподъемности баржи изменяются и относительные приведенные затраты.

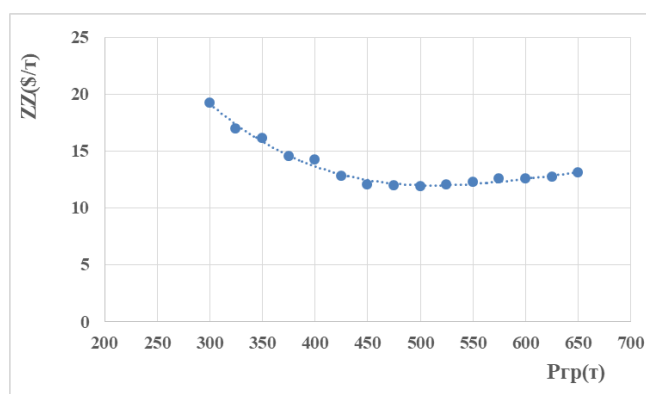


Рис. 21 Зависимость относительных приведенных затрат ББК от грузоподъемности баржи для линии Янгон - Мандалей.

Заключение. В ходе диссертационного исследования была разработана и реализована в виде программно-методического комплекса математическая модель проектирования ББК для Республики Союз Мьянма. При разработке проектного обоснования ББК получены следующие основные результаты:

1. Выполнен статистический анализ основных проектных характеристик построенных и эксплуатирующихся барже-буксирных комплексов (ББК) в различных странах мира.
2. Рассмотрены внешняя задача проектирования ББК и выбор характерной эксплуатационной линии, расположенной между Янгоном и Мандалаем на основном внутреннем водном пути Республики Союз Мьянма — реке Ирравади.
3. Разработанная математическая модель проектирования ББК с учётом особенности эксплуатации в условиях Республики Союз Мьянма даёт возможность её использования при проектировании ББК на любых участках внутренних водных путей.
4. Создан программно-методический комплекс, позволяющий определить основные элементы ББК на начальных стадиях проектирования. Созданный программно-методический комплекс представлен в виде, удобном для практического использования.
5. В результате работы были полностью определены параметры основных типов барже-буксирных комплексов для перспективной системы внутреннего водного транспорта Республики Союз Мьянма, включая выбор основных типов судов и определение их конструктивных особенностей, что может служить основой для развития такой системы.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Апалько Т.А., Гайкович А.И., Най Мьо Хлаинг Определения буксировочной мощности для барже-буксирных комплексов для союза Мьянма // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — Т. 1. — № 4(42). — С. 95–100.
2. Апалько Т.А., Най Мьо Хлаинг Уравнение вместимости буксира для Республики Мьянма // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — Т. 3. — № 4. — С. 102–109.
3. Апалько Т.А., Най Мьо Хлаинг Исследование математической модели проектирования баржебуксирного комплекса для Республики Союз Мьянма // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — Т. 3. — № 2. — С. 82–87.