



2022 СЕТЕВОЕ ИЗДАНИЕ

№ 4(53) Научный журнал

**ВЕСТНИК
ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО
ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

СОДЕРЖАНИЕ

2022. № 4(53)

Механика деформированного твердого тела

СЁМКА Э.В. Качественный и количественный анализ упругопластического состояния вращающегося тонкого диска

Теория корабля и строительная механика

ЗЕМЛЯК В.Л., ВАСИЛЬЕВ А.С., КОЗИН В.М., ЧИНГАЛАЕВ С.А. Движение погруженного тела в приповерхностной водной среде при малой глубине дна

Проектирование и конструкции судов

ГУТНИК А.А., КЛИМОВ С.О., GERMAN A.П. Способ снятия судна с илистого грунта

КОЧНЕВ Ю.А. Потенциал безопасности грузового судна

КИТАЕВ М.В., ТЮФТЯЕВ Д.В., ТОРТЫЖЕВА Д.А. Математическая модель проектирования грузового судна

Технология и организация судостроения и судоремонта

ЛЕОНТЬЕВ Л.Б., ЛЕОНТЬЕВ А.Л. Концепция конструктивно-технологического обеспечения долговечности триботехнических узлов судового оборудования

Судовые энергетические установки

СТАЦЕНКО В.Н., САДЫКОВ Р.Х., ГОНЧАРОВА И.А., БЕРНАВСКАЯ М.В. Обобщение исследований пленочной жидкостной нейтрализации токсичных газовых выбросов

ПОКУСАЕВ М.Н., СИБЯРЕВ К.О., ГОРБАЧЕВ М.М., ИБАДУЛЛАЕВ А.Д. Методика выбора пружинного демпфера крутильных колебаний судового дизеля

МАЗУР Е.В., ЩЕРБАНЬ П.С., МАЗУР В.С. Исследование рабочих характеристик моторного масла судового двигателя с применением матрицы параметров процесса

Водоснабжение, строительные системы охраны водных ресурсов

ТИГАНОВ Р.Е., ПАНФИЛОВ А.П., ТИХОНОВ Р.А. Модель многоканальной системы

контроля температуры воды в аквариумных танках

КИРИЧЕНКО К.Ю., ЧЕРНОУСОВ В.А., ВАХНЮК И.А., ПАРШИН С.Г., МАСЮТИН А.Г., ГРИДАСОВ А.В., ПОГОДАЕВ А.В., ПИКУЛА К.С., ГОЛОХВАСТ К.С. Исследование морфологического состава частиц в пробах воды при подводной сварке

Строительные конструкции, здания и сооружения

БОБОВ Д.Г., КРАСИЛЬНИКОВ Н.И., ГУСЕЙНОВ Ч.С. Оценка потенциального уровня автоматизации строительных журналов при ведении их в электронном виде

КАРДАШ Д.Е. Частная методика оценки эффективности аддитивной технологии строительства объектов военной инфраструктуры

Строительная механика

ГОРЯЧЕВСКИЙ О.С., НЕГРОЗОВА И.Ю. Неопределенность назначения ветровых нагрузок от флага

Творческие концепции архитектурной деятельности

МАТВЕЕВА М.А., КОПЬЁВА А.В., МАСЛОВСКАЯ О.В. Экспериментальный проект архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра в г. Якутск

Ответственные за номер:

Китаев Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент
Леонтьев Лев Борисович, доктор технических наук, профессор
Беккер Александр Тевьевич, академик РААСН, доктор технических наук, профессор

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Над номером работали:

Л.В. Студенчикова, редактор,
Т.В. Рябкова, веб-редактор
Г.П. Писарева, дизайн, верстка
Объем 9 МБ [17,9 усл. печ. л.]
Публикация: 27.12.2022

Механика деформированного твердого тела

Научная статья

УДК 539.376

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/3-12>

Э.В. Сёмка

СЁМКА ЭЛЕОНОРА ВИКТОРОВНА – к.ф.-м.н., преподаватель кафедры радиоэлектроники Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил, semka_elya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>

Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина
Воронеж, Россия

Качественный и количественный анализ упругопластического состояния вращающегося тонкого диска

Аннотация. Рассмотрена задача о вращающемся диске с неизменной малой толщиной, находящемся под действием равномерно распределенного давления по его контуру. Полные деформации равны сложению упругих и пластических, так как деформации достаточно малы. Пластические деформации и напряжения взаимосвязаны законом пластического течения. Рассматривается пластически несжимаемое изотропное тело. Выполняется условие непрерывности функции пластичности. Векторы напряжений и перемещений непрерывны на границе раздела упругих и пластических зон. При определении пластических зон в зависимости от внешних параметров рассмотрены все возможные режимы условия пластичности максимального касательного напряжения. Представлены аналитические выражения для внешних параметров, при которых происходит зарождение пластических зон. Графики годографа напряжений, представленные в работе, дают наглядное представление развития пластических зон.

Ключевые слова: упругопластическое тело, плоское напряженное состояние, теория пластического течения, ассоциированный закон пластического течения, годограф вектора напряжений

Для цитирования: Сёмка Э.В. Качественный и количественный анализ упругопластического состояния вращающегося тонкого диска // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 3–12.

Введение

Определение напряжений во вращающихся дисках актуально, так как они используются в турбинах, генераторах, ротационных плугах, ротационных культиваторах и других технических устройствах. Работы по исследованию быстровращающихся дисков в простейшей постановке задачи были выполнены авторами [11, 16, 17].

Для правильного построения технологических процессов интересна оценка нагрузки на инструмент, оборудование, при которой объект остается пригодным к использованию. Границы значения внешних параметров для модели идеального жесткопластического тела при условии пластичности максимального касательного напряжения определяются авторами работ [1, 15]. В рамках механики сплошных тел рассмотрена задача о напряженно-деформированном состоянии в быстровращающемся диске постоянной толщины для условия пластичности Мизеса [3, 4, 14]. Для анализа распределения упругих/пластических напряжений и деформаций внутри вращающихся кольцевых дисков, изготовленных из идеально пластичного материала, в условиях плоского напряжения используется критерий пластичности Мизеса в сочетании со связанной с ней теорией пластичности [16]. Рассматриваются задачи расчета плоских температурных напряжений в условиях пластического течения максимальных приведенных

напряжений (критерий Ишлинского–Ивлева) [2, 7, 9]. Изучается процесс производства необратимых деформаций во вращающемся цилиндре, изготовленном из материала с упругими, вязкими и пластическими свойствами, где в качестве пластического потенциала принимаем обобщенный потенциал Мизеса [8]. Также представлено исследование ползучести однородного вращающегося цилиндра с помощью кусочно-линейного степенного потенциала [10]. Другие работы связаны с использованием условия постоянства максимально касательного напряжения [12, 13, 15, 17, 18].

Обзор научных изданий, посвященных исследованию напряженно-деформированного состояния вращающегося диска, показывает, что в большинстве работ определение напряжений и деформаций проводилось, когда давление на внешнем контуре диска отсутствовало [1, 3, 4, 13–15, 17, 18]. В настоящей статье с учетом условия пластичности максимального касательного напряжения определяется зависимость материальных параметров и параметров внешних воздействий, когда исследуемый объект находится в определенном состоянии.

Формулировка задачи

Разбирается осесимметричная задача о вращающемся диске с неизменной малой толщиной. Выбирается цилиндрическая система координат ρ, θ, z . В центре диска выполняется симметрия поля напряжений $\sigma_\rho|_{\rho=0} = \sigma_\theta|_{\rho=0}$. Напряжения в точках, находящихся на оси Oz , нет, то есть $\sigma_z = 0$. На контур диска $\rho = b$ действует равномерно распределенное давление $\sigma_\rho|_{\rho=b} = -p_b$.

Необходимо определить материальные и внешние параметры, при которых исследуемый объект переходит в пластическое состояние при определенных режимах условия пластичности Треска–Сен-Венана.

Основные математические соотношения

В цилиндрической системе координат ρ, θ, z , с учетом постановки задачи, запишем уравнение равновесия [11]:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} + m\rho = 0, \tag{1}$$

где $m = \tau b^2 \omega^2 / kg$ – параметр инерционного воздействия, ω – скорость вращения, τ – удельный вес, g – ускорение, возникающее в результате действия силы тяжести.

Выражения для упругих деформаций $\varepsilon_\rho^e, \varepsilon_\theta^e, \varepsilon_z^e$ по направлению главных напряжений $\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_z$:

$$\varepsilon_\rho^e = \frac{1}{E}(\sigma_\rho - \nu\sigma_\theta), \quad \varepsilon_\theta^e = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu\sigma_\rho), \quad \varepsilon_z^e = \frac{-\nu}{E}(\sigma_\rho + \sigma_\theta), \tag{2}$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Выражение, определяющее связь пластических деформаций с условием текучести [6]:

$$\frac{d\varepsilon_\rho^p}{\partial F / \partial \sigma_\rho} = \frac{d\varepsilon_\theta^p}{\partial F / \partial \sigma_\theta} = \frac{d\varepsilon_z^p}{(\partial f / \partial \sigma_z)|_{\sigma_z=0}}, \quad F = f|_{\sigma_z=0}, \tag{3}$$

где F – условие текучести.

В пластической области не происходит разгрузки при изменении нагрузки; интегрируя выражение (3), запишем:

$$\varepsilon_\rho^p = \frac{\partial F / \partial \sigma_\rho}{\partial F / \partial \sigma_\theta} \varepsilon_\theta^p, \quad \varepsilon_z^p = \frac{(\partial f / \partial \sigma_z)|_{\sigma_z=0}}{\partial F / \partial \sigma_\theta} \varepsilon_\theta^p. \tag{4}$$

Деформации во вращающемся диске считаем малыми, поэтому запишем аддитивное разложение полных деформаций на деформации упругие $\varepsilon_\rho^e, \varepsilon_\theta^e, \varepsilon_z^e$ и пластические $\varepsilon_\rho^p, \varepsilon_\theta^p, \varepsilon_z^p$:

$$\varepsilon_\rho^p = \varepsilon_\rho - \varepsilon_\rho^e, \quad \varepsilon_\theta^p = \varepsilon_\theta - \varepsilon_\theta^e, \quad \varepsilon_z^p = -\varepsilon_z^e, \quad (\varepsilon_z^e = 0). \quad (5)$$

Перемещения u определяются соотношениями

$$\varepsilon_\rho = \frac{du}{d\rho}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{\rho}, \quad (6)$$

где u – радиальное перемещение.

Условие совместности деформаций:

$$\rho \frac{d\varepsilon_\theta}{d\rho} + \varepsilon_\theta - \varepsilon_\rho = 0. \quad (7)$$

Условие текучести максимального касательного напряжения:

$$F = \max \{ |\sigma_\rho - \sigma_\theta|, |\sigma_\theta - \sigma_z|, |\sigma_z - \sigma_\rho| \} - 2k, \quad (8)$$

где k – лимит прочности при одноосном растяжении.

На линии перехода исследуемого объекта из упругого в пластическое состояние не происходит скачкообразного изменения напряжений и перемещений:

$$[u]|_{\rho=c_1} = 0, \quad [\sigma_\rho]|_{\rho=c_1} = 0, \quad [\sigma_\theta]|_{\rho=c_1} = 0. \quad (9)$$

где $[]$ – скобка обозначает скачок величин на линии перехода ($\rho = c_1$) из упругого в пластическое состояние.

Годограф вектора напряжений

Для известных выражений напряжений в области упругого состояния [12]

$$\begin{aligned} \sigma_\rho &= -\frac{3+\nu}{8} m\rho^2 + A - \frac{B}{\rho^2}, \\ \sigma_\theta &= -\frac{1+3\nu}{8} m\rho^2 + A + \frac{B}{\rho^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

определим константы A, B согласно сформулированной задаче. Величина $B = 0$, так как напряжения в центре диска $\rho = 0$ конечны.

По условию задачи на контуре диска действует давление p_b , тогда радиальное напряжение $\sigma_\rho|_{\rho=b} = -p_b$. Следовательно, $A = \frac{3+\nu}{8} mb^2 - p_b$, тогда запишем выражения для напряжений

$$\begin{aligned} \sigma_\rho &= \frac{3+\nu}{8} m(b^2 - \rho^2) - p_b, \\ \sigma_\theta &= \frac{3+\nu}{8} m(b^2 - \mu\rho^2) - p_b, \quad \mu = \frac{1+3\nu}{3+\nu}. \end{aligned} \quad (11)$$

Выразим σ_θ через σ_ρ :

$$\sigma_\theta = \mu\sigma_\rho + (1-\nu) \left(\frac{mb^2}{4} - \frac{2p_b}{3+\nu} \right). \quad (12)$$

Выражение (11) представляет годограф вектора напряжений $\bar{\sigma}(\sigma_\rho, \sigma_\theta)$.

Результаты исследования

Зарождение пластической области в центре диска происходит, если

$$\begin{cases} 0.2 \leq \nu \leq 0.5, \\ m = m_0 = \frac{8(k + p_b)}{(3 + \nu)b^2}, \\ -k < p_b < k, \end{cases} \quad (13)$$

Режимы условия пластичности Треска: $\sigma_\theta = k, 0 \leq \sigma_\rho \leq k$.

Годограф вектора напряжений при зарождении пластической зоны в центре диска представлен на рис. 1а.

При зарождении пластической области на контуре диска материальные и внешние параметры следующие:

$$\begin{cases} 0 \leq \nu \leq 0.2, \\ m = m_b = \frac{4k}{(1 - \nu)b^2}, \\ p_b = k, \end{cases} \quad (14)$$

Режимы условия пластичности Треска: $\sigma_\rho = -k, -k \leq \sigma_\theta \leq 0$.

Годограф вектора напряжений при зарождении пластической зоны на контуре диска представлен на рис. 1б.

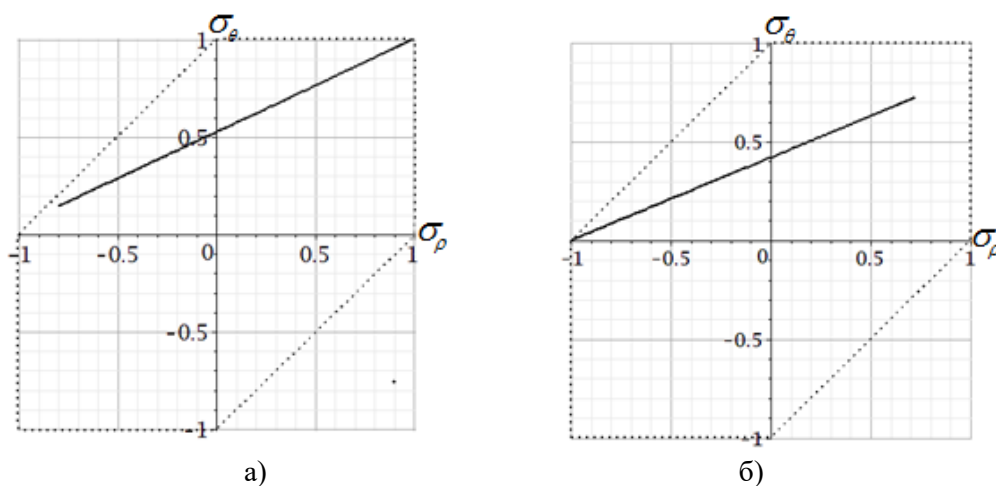


Рис. 1. Годограф вектора напряжений:

а) зарождение пластической зоны в центре диска $\nu = 0.2, p_b = 0.8k, m = 4.5$;

б) зарождение пластической зоны на контуре диска $\nu = 0.1, p_b = k, m = 4.44$.

Зарождение пластической области в центре и на контуре диска, режимы условия пластичности Треска $\sigma_\theta - \sigma_\rho = k, -k \leq \sigma_\rho \leq 0, \sigma_\theta = k, 0 \leq \sigma_\rho \leq k$, если

$$\begin{cases} \nu = 0.2, \\ m = m_0 = m_b, \\ p_b = k, \end{cases} \quad (15)$$

Годограф вектора напряжения при зарождении пластической зоны в центре и на контуре диска представлен на рис. 2.

При выполнении режимов пластичности Треска $\sigma_\theta = k, 0 \leq \sigma_\rho \leq k, \sigma_\theta - \sigma_\rho = k, -k \leq \sigma_\rho \leq 0$ пластическая зона в центре диска будет увеличиваться, если

$$\begin{cases} \nu \in [0; 0.2] , \\ m < \frac{8(k + p_b)}{(3 + \nu)b^2} , \\ p_b < k, \end{cases} \quad (16)$$

или

$$\begin{cases} \nu \in [0; 0.2) , \\ \frac{3k}{(1 - \nu)b^2} \leq m \leq \frac{4k}{(1 - \nu)b^2} , \\ p_b = \frac{1 + \nu}{4} mb^2 - \frac{b}{12} \sqrt{3(1 + 3\nu)(4km - (1 - \nu)b^2 m^2)} - \frac{k}{2}. \end{cases} \quad (17)$$

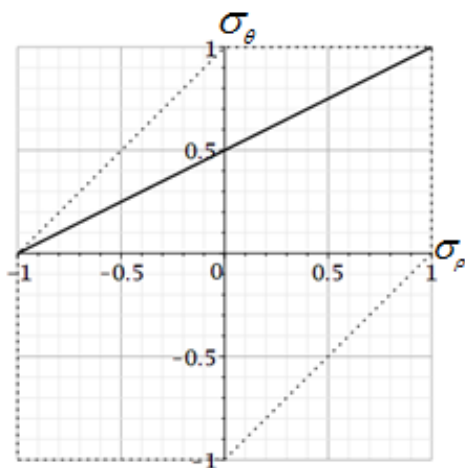


Рис. 2. Годограф вектора напряжений:
зарождение пластической зоны в центре и на контуре диска $\nu = 0.2, p_b = k, m = 5$

Представим годограф вектора напряжений при росте пластической зоны в центре диска (рис. 3).

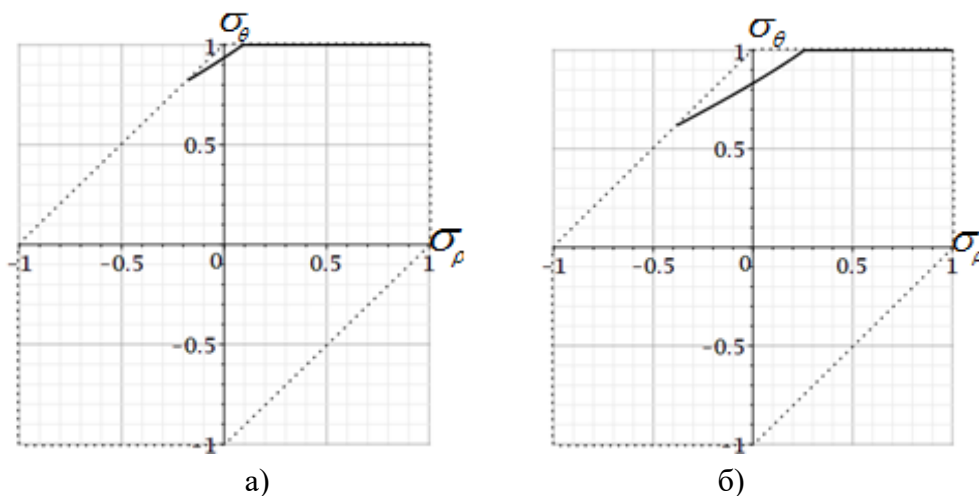


Рис. 3. Годограф вектора напряжений:
а) рост пластической зоны в центре диска: $\nu = 0.15, p_b = 0.18k, m = 3.5, c_1 = 0.88$. ;
в) рост пластической зоны в центре диска: $\nu = 0.15, p_b = 0.38k, m = 4, c_1 = 0.75$.

Зарождение пластической области в центре диска, рост пластической зоны на контуре диска для режимов условия пластичности Треска $\sigma_\theta - \sigma_\rho = k$, $-k \leq \sigma_\rho \leq 0$, $\sigma_\theta = k$, $0 \leq \sigma_\rho \leq k$ происходит, если

$$\begin{cases} \nu \in [0; 0.2], \\ \frac{4k}{(1+\nu)b^2} \leq m \leq \left(5k - k \ln\left(\frac{4k}{(1-\nu)b^2}\right)\right) / b^2, \\ p_b = \frac{(1+3\nu)k}{2(1-\nu)}. \end{cases} \quad (18)$$

Годограф вектора напряжений при росте пластической зоны на контуре диска представлен на рис. 4.

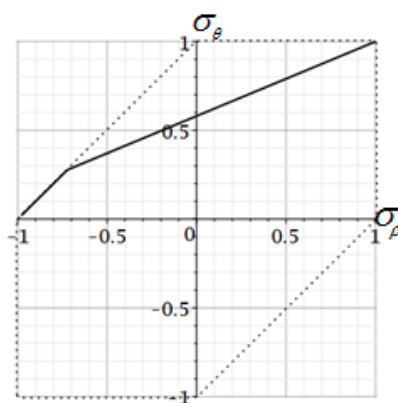


Рис. 4. Годограф вектора напряжений:
рост пластической зоны на контуре диска $\nu = 0.1$, $m = 5.09$, $p_b = 0.98k$, $c_2 = 0.93$.

Одновременный рост пластической зоны в центре диска и на контуре диска при режимах $\sigma_\theta = k, 0 \leq \sigma_\rho \leq k$, $\sigma_\theta - \sigma_\rho = k$, $-k \leq \sigma_\rho \leq 0$ условия пластичности Треска выполняются при условии

$$\begin{cases} \nu \in [0; 0.2], \\ \frac{3k}{(1-\nu)b^2} \leq m \leq \frac{4k}{(1-\nu)b^2}, \\ p_b = k. \end{cases} \quad (19)$$

Годограф вектора напряжения при одновременном росте пластической зоны в центре диска и на контуре диска показан на рис. 5.

Диск переходит в предельное состояние, при рассмотрении режимов $\sigma_\theta = k, 0 \leq \sigma_\rho \leq k$, $\sigma_\theta - \sigma_\rho = k$, $-k \leq \sigma_\rho \leq 0$ условия пластичности Треска, когда материальные параметры и параметры нагрузки соответствуют условиям (20):

$$\begin{cases} 0.2 \leq \nu \leq 0.5, \\ 3k + k \ln \frac{b^2 m_{\max}}{3k} - b^2 m_{\max} = 0, \\ p_b = \frac{mb^2 - 3k}{2} - k \ln \frac{b}{c}. \end{cases} \quad (20)$$

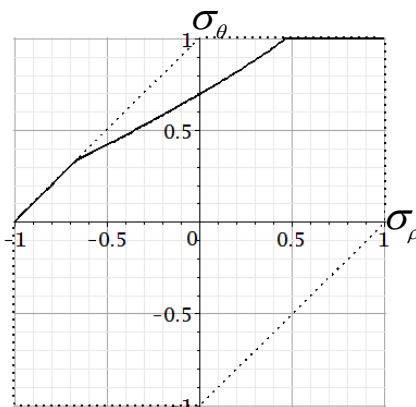


Рис. 5. Годограф вектора напряжения:

$\nu = 0.2; m = 5.0, c_1 = 0.56, c_2 = 0.91, 0 \leq \rho \leq c_1, c_2 \leq \rho \leq b.$

Годограф вектора напряжений, когда дальнейшая эксплуатация диска недопустима, представлен на рис. 6.

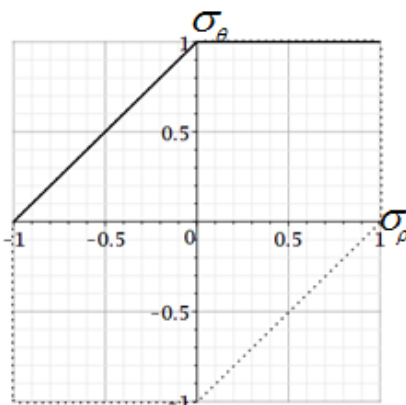


Рис. 6. Годограф вектора напряжения:

предельное состояние диска $\nu = 0.5, p_b = k, m = 5.63k.$

Заключение

Получены аналитические зависимости для материальных параметров и параметров внешних воздействий, при которых начинается развитие пластических зон. Правильность определения аналитических зависимостей позволяет верифицировать годограф вектора напряжений. В данном исследовании учитывалось влияние давления, распределенного равномерно на контуре диска, и изменения скорости вращения на формирование пластических зон. Дальнейшая работа связана с исследованием изотропного материала, для которого коэффициент Пуассона лежит в интервале от -1 до $0,2$.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Акиншин В.В., Колодяжный В.Э., Найденов А.Е., Скорняков Н.С. Предельное состояние вращающегося диска // Инженерный вестник Дона. 2019. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2015/5933 (дата обращения: 04.11.2022).
2. Абашкин Е.Е., Ткачева А.В., Щербатюк Г.А. Условие пластичности максимальных приведённых касательных напряжений в качестве средства расчётов эволюции плоских напряжённых состояний // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2018. Т. 1, № 2(34). С. 51–62.

3. Александрова Н.Н., Артемов М.А., Барановский Е.С., Шашкин А.И. О напряженном и деформированном состоянии вращающегося диска // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 17–19 декабря 2018 г. Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2019. С. 1006–1011.
4. Акиншин В.В., Артемов М.А., Барановский Е.С., Скорняков Н.С., Фатхудинов Д.Б. Математическое моделирование упругопластического состояния вращающегося диска // Инженерный вестник Дона. 2019. № 6(57). С. 35. EDN: QNYDJT
5. Артемов М.А., Барановский Е.С., Сёмка Э.В., Шашкин А.И. Об использовании кусочно-линейных функций пластичности // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 11–13 ноября 2019 г. Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2020. С. 1234–1239.
6. Бердзенишвили Г.Г., Пеньков Н.А., Сёмка Э.В., Фатхудинов Д.Б. Математическое моделирование состояния вращающегося диска // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XIX междунар. науч.-метод. конф., Воронеж, 14–15 февраля 2019 г. Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2019. С. 210–216.
7. Буренин А.А., Каинг М., Ткачева А.В. К расчету плоских напряженных состояний в теории неустановившихся температурных напряжений в упругопластических телах // Дальневосточный математический журнал. 2018. Т. 18, № 2. С. 131–146.
8. Фирсов С.В., Прокудин А.Н., Буренин А.А. Ползучесть и пластическое течение во вращающемся цилиндре с жестким включением // Сибирский журнал индустриальной математики. 2019. Т. 22, № 4(80). С. 121–133.
9. Буренин А.А., Ткачева А.В. Кусочно-линейные пластические потенциалы как средство расчетов плоских неустановившихся температурных напряжений // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2020. № 6. С. 40–49.
10. Ковтанюк Л.В., Прокудин А.Н., Фирсов С.В. Кусочно-линейный потенциал ползучести в деформациях ползучести быстровращающегося цилиндра // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2018. Т. 1, № 3 (35). С. 101–108.
11. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. Москва: Наука, 1969. 420 с.
12. Прокудин А.Н., Фирсов С.В. Упругопластическое деформирование вращающегося полого цилиндра с жестким внешним покрытием // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 4. С. 120–135.
DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.12
13. Соколовский В.В. Пластическое напряженное состояние вращающихся дисков // Прикладная математика и механика. 1948. Т. 1, вып. 1. С. 87–94.
14. Aleksandrova N.N., Artemov M.A., Baranovskii E.S., Shashkin A.I. On stress/strain state in a rotating disk. *Journal of Physics. Conf. Series*. 2019;1203:012001. DOI: 10.1088/1742-6596/1203/-1/012001
15. Eraslan A.N. Tresca's yield criterion and linearly hardening rotating solid disks having hyperbolic profiles. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2004;69:17–28.
16. Lomakin E., Alexandrov S., Jeng Y.R. Stress and strain fields in rotating elastic/plastic annular discs. *Archive of Applied Mechanics*. 2016;86:235–244.
17. Syomka E.V., Artemov M.A., Babkina Y.N., Baranovskii E.S., Shashkin A.I. Mathematical modeling of rotating disk states. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2020;1479:012122. DOI: 10.1088/1742-6596/1479/1/012122
18. Timoshenko S.P., Goodier J.N. Theory of elasticity. New York, McGraw-Hill, 1970. 506 p.

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/3-12>

Syomka E.

ELEONORA V. SYOMKA, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lecturer, semka_elya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>
 Military Training and Scientific Center of the Air Force
Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarina
 Voronezh, Russia

Qualitative and quantitative analysis of the elastoplastic state of a rotating thin disk

Abstract. The task of a rotating disk with a constant small thickness, which is under the action of a uniformly distributed pressure along its contour, was considered. Total deformations are equal to the addition of elastic and plastic ones, since the deformations are quite small. Plastic deformations and stresses are interconnected by the plastic flow rule. A plastically incompressible isotropic body is considered. The condition of continuity of the plasticity function is satisfied. The stress and displacement vectors are continuous at the interface between elastic and plastic zones. When determining the plastic zones, depending on the external parameters, all possible modes of the plasticity condition of the maximum shear stress were considered. Analytical expressions are presented for the external parameters at which the nucleation of plastic zones occurs. The stress hodograph plots, presented in the paper, give a visual representation of the development of plastic zones.

Keywords: elastoplastic body, plane stress state, plastic flow theory, associated plastic flow rule, stress vector hodograph

For citation: Syomka E. Qualitative and quantitative analysis of the elastoplastic state of a rotating thin disk. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):3–12. (In Russ.).

The author declares no conflict of interests.

REFERENCES

1. Akinshin V.V., Kolodyazhny V.E., Naydenov A.E., Skorniyakov N.S. Limit state of a rotating disk. *Engineering Journal of Don*. 2019;(5). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2015/5933 (In Russ.).
2. Abashkin E.E., Tkacheva A.V., Shcherbatyuk G.A. The condition of plasticity of maximum reduced shear stresses as a means of calculating the evolution of plane stress states. *Uchenye zapiski tekhnicheskogo Komsomolskogo-on-Amur gosudarstvennogo universiteta*. 2018;1(2/34): 51–62. (In Russ.). Aleksandrova N.N., Artemov M.A., Baranovskii E.S., Shashkin A.I. On the stressed and deformed state of a rotating disk. *Actual problems of applied mathematics, informatics and mechanics: Proc. of the Int. Sci. and Tech. Conf., Voronezh, December 17–19, 2018*. Voronezh, Scientific and Research Publications Publishing House, 2019. 1006–1011 p. (In Russ.).
3. Akinshin V.V., Artemov M.A., Baranovsky E.S., Skorniyakov N.S., Fatkhudinov D.B. Mathematic modeling of the elasto-plastic state of a rotating disk. *Engineering Journal of Don*. 2019;(8):35. EDN: QNYDJT (In Russ.).
4. Artemov M.A., Baranovsky E.S., Semka E.V., Shashkin A.I. On the use of piecewise linear plasticity functions. *Actual problems of applied mathematics, informatics and mechanics: Proc. of the Int. Sci. and Tech. Conf., Voronezh, November 11–13, 2019*. Voronezh, Scientific and Research Publications Publishing House, 2020. 1234–1239 p. (In Russ.).
5. Berdzenishvili G.G., Penkov N.A., Syomka E.V., Fatkhudinov D.B. Mathematical modeling of the state of a rotating disk. *Informatics: problems, methodology, technologies: Proc. of the XIX Int. Sci. and Meth. Conf., Voronezh, February 14–15, 2019*. Voronezh, Scientific and Research Publications Publishing House, 2019. 210–216 p. (In Russ.).

6. Burenin A.A., Kaing M., Tkacheva A.V. On the calculation of plane stress states in the theory of transient temperature stresses in elastic-plastic bodies. *Far Eastern Mathematical Journal*. 2018;18(2):131–146. (In Russ.).
7. Firsov S.V., Prokudin A.N., Burenin A.A. Creep and plastic flow in a rotating cylinder with a rigid inclusion. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. 2019;13(4):642–652. (In Russ.).
8. Burenin A.A., Tkacheva A.V. Piecewise linear plastic potentials as a means of calculating plane unsteady temperature stresses. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Solid State Mechanics*. 2020;(6):40–49. (In Russ.).
9. Kovtanyuk L.V., Prokudin A.N., Firsov S.V. Piecewise linear creep potential in creep deformations of a rapidly rotating cylinder. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-on-Amur gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018;1(3):101–108. (In Russ.).
10. Kachanov L.M. Fundamentals of the theory of plasticity. Moscow, Nauka, 1969. 420 p. (In Russ.).
11. Prokudin A.N., Firsov S.V. Elastoplastic deformation of a rotating hollow cylinder with a rigid casing. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019;(4):120–135. (In Russ.).
12. Sokolovsky V.V. Plastic stress state of rotating. *Prikladnaya matematika i mekhanika*. 1948;1(1):87–94. (In Russ.).
13. Aleksandrova N.N., Artemov M.A., Baranovskii E.S., Shashkin A.I. On stress/strain state in a rotating disk. *Journal of Physics. Conf. Series*. 2019;1203:012001. DOI: 10.1088/1742-6596/1203/-1/012001
14. Eraslan A.N. Tresca's yield criterion and linearly hardening rotating solid disks having hyperbolic profiles. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2004;69:17–28.
15. Lomakin E., Alexandrov S., Jeng Y.R. Stress and strain fields in rotating elastic/plastic annular discs. *Archive of Applied Mechanics*. 2016;86:235–244.
16. Syomka E.V., Artemov M.A., Babkina Y.N., Baranovskii E.S., Shashkin A.I. Mathematical modeling of rotating disk states. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2020;1479:012122. DOI: 10.1088/1742-6596/1479/1/012122
17. Timoshenko S.P., Goodier J.N. Theory of elasticity. New York, McGraw-Hill, 1970. 506 p.

Теория корабля и строительная механика

Научная статья

УДК 532.3; 532.5; 629.585

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/13-22>

В.Л. Земляк, А.С. Васильев, В.М. Козин, С.А. Чингалаев

ЗЕМЛЯК ВИТАЛИЙ ЛЕОНИДОВИЧ – к.ф.-м.н., доцент, vellkom@list.ru,

<http://orcid.org/0000-0002-3218-5738>

ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ – к.т.н., доцент, vasil-grunt@mail.ru,

<http://orcid.org/0000-0001-7783-0000>

ЧИНГАЛАЕВ СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ – аспирант, vellkom@list.ru,

Кафедра технических дисциплин

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема

Биробиджан, Россия

КОЗИН ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник

лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, vellkom@list.ru

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

Комсомольск-на-Амуре, Россия

Движение погруженного тела в приповерхностной водной среде при малой глубине дна

Аннотация. Силы и моменты, действующие на погруженное тело со стороны жидкости, существенно влияют на характер его движения. Значительное влияние на рассматриваемые параметры может оказывать глубина акватории, в которой перемещается тело. Несмотря на важность исследования этих параметров, отвечающих за безопасность и маневренность подводного аппарата, теоретических и особенно экспериментальных работ по данной тематике практически не встречается. В данной статье авторами предложен алгоритм, разработанный на базе программного комплекса ANSYS 19 R2 Academic Research, который позволяет определять силы и моменты, действующие на погруженное тело асимметричной формы во время его движения в приповерхностной водной среде с различной скоростью при ограниченной глубине дна. Выполнено сопоставление полученных результатов с данными модельных экспериментов. Установлено влияние глубины акватории на зависимости исследуемых параметров.

Ключевые слова: погруженное тело, подъемная сила, гидродинамический момент, свободная поверхность, глубина дна

Для цитирования: Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М., Чингалаев С.А. Движение погруженного тела в приповерхностной водной среде при малой глубине дна. 2022. № 4(53). С. 13–22.

Введение

В последние годы растет интерес к исследованиям, связанным с движением погруженных тел вблизи свободной поверхности жидкости. Это обусловлено как расширением числа тактических задач и маневров, выполняемых подводными аппаратами, так и ростом скорости их движения на малых заглублениях. Известно, что при движении погруженного тела на малой глубине в результате перераспределения давления вдоль его корпуса на поверхности жидкости генерируются гравитационные волны [10]. Генерация поверхностных волн приводит к росту силы сопротивления, испытываемого телом [9, 13]. Однако помимо волнового сопротивления

© Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М., Чингалаев С.А., 2022

Статья: поступила: 08.08.2022; рецензия: 03.09.2022; финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00118).

R_x на подводный аппарат, движущийся вблизи свободной поверхности, действуют также подъемная сила F_z и гидродинамический момент M_y . В связи с этим все большее внимание уделяется оценке влияния различных факторов на гидродинамику погруженного тела. С помощью математических методов было исследовано влияние заглубления, скорости движения, относительного удлинения и коэффициента продольной полноты на силы и моменты, действующие на погруженное тело [4, 8, 11, 12, 14]. К. Divsalar [6] выполнил оценку влияния формы носовой и кормовой оконечности тела на исследуемые параметры. Особый интерес представляет работа Dawson [5], где в ходе экспериментального и численного моделирования показано, что сопротивление, подъемная сила и гидродинамический момент изменяются в зависимости от числа Фруда $Fr = \frac{u}{\sqrt{gL}}$ (где u – скорость движения, g – ускорение свободного падения, L – длина погруженного тела) и напрямую зависят от длины гравитационных волн, генерируемых на свободной поверхности жидкости от движения погруженного тела. Dawson установил, что при движении влияние волнового сопротивления вторично, а наибольшее эксплуатационное значение приобретают подъемная сила и гидродинамический момент, вызывающий дифферент судна. Очевидно, что значения сил и моментов уменьшаются с ростом заглубления тела, однако вопрос влияния глубины акватории на исследуемые параметры остается открытым.

Целью работы было экспериментально-теоретическое исследование зависимости R_x , F_z и M_y погруженного тела от глубины акватории.

Подготовка к проведению модельных и численных экспериментов

Модельные эксперименты проводились на базе опытового бассейна лаборатории ледотехники (Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, г. Биробиджан) [3] в январе–феврале 2022 г. Для экспериментов использовалась модель погруженного тела ассиметричной формы круглого сечения с цилиндрической вставкой и относительным удлинением $L^* = L/D = 8,4$ при $L = 1,154$ м (где D – диаметр). Модель была изготовлена посредством послойной печати на принтере Raise3D. Теоретический чертеж погруженного тела выполнен в AutoCAD 2019 (рис. 1). Моделирование турбулентного режима течения в пограничном слое осуществлялось с помощью искусственного турбулизатора в виде полосы Нама [7], расположенной на расстоянии $0,05L$ от носового перпендикуляра. С учетом длины модели особенностями ее изготовления и требуемой высотой турбулизатора полоса Нама оказалась оптимальным решением, обеспечивающим достаточный уровень устойчивого турбулентного потока при минимальном увеличении сопротивления по сравнению с эквивалентными ей проволочными турбулизаторами. Коэффициент полноты мидель-шпангоута для модели равнялся $\beta = 0,785$, коэффициент общей полноты – $\delta = 0,673$.

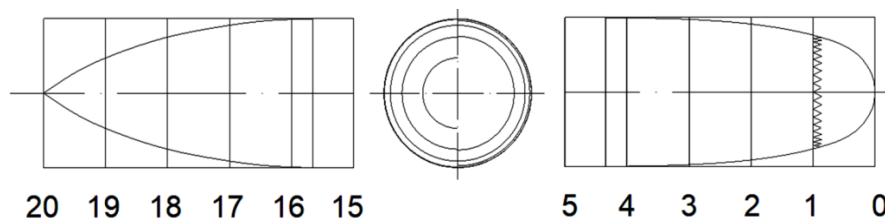


Рис. 1. Теоретический чертеж модели погруженного тела
Здесь и далее иллюстрации В.Л. Земляка

Геометрическая форма и размеры модели тела полностью соответствовали модели, использованной в работе [1]; там же описаны особенности и методика проведения модельных экспериментов для определения относительного вертикального перемещения тела $h^* = (h_b - h)/h$ (где h_b – отклонение модели от первоначально заданного заглубления h) под воздействием подъемной силы F_z . Выполнена оценка сопоставления полученных результатов с данными известных исследований для случая глубокой воды.

Для проведения настоящего исследования в бассейне дополнительно на специальных вертикальных подъемниках были установлены четыре секции подвешенного дна, которые моделировали заданную глубину акватории $H_b=2,9D$. Схема проведения эксперимента показана на рис. 2, размеры указаны в метрах. Величина первоначально заданного заглубления моделей равнялась $h_1=1,16D$ и $h_2=1,45D$, скорость движения – $Fr=0,3-0,77$.

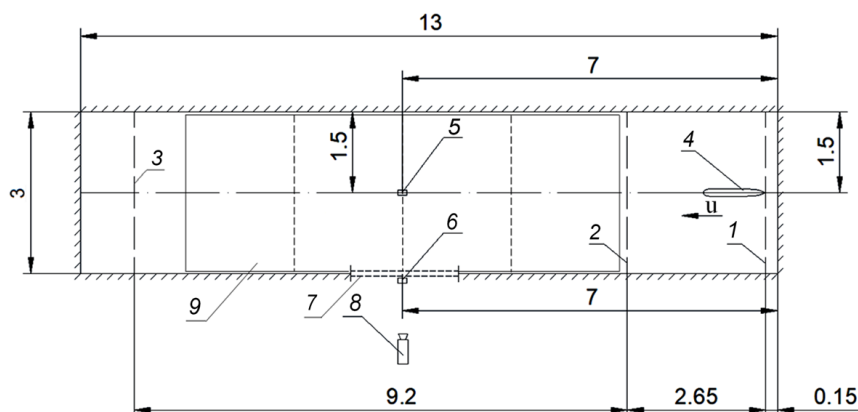


Рис. 2. Схема проведения эксперимента (вид сверху):

- 1 – линия начала движения модели; 2 – линия окончания разгонного участка;**
- 3 – линия окончания стационарного участка движения; 4 – модель погруженного тела;**
- 5 – датчик перемещений; 6 – датчик скорости; 7 – водонепроницаемое окно;**
- 8 – камера высокого разрешения; 9 – секции двойного дна**

Численное моделирование движения тела в условиях ограниченной глубины акватории осуществлялось с помощью математической модели, разработанной авторами в программном комплексе ANSYS 19 R2 Academic Research и подробно описанной в работе [2]. В целях решения поставленных в исследовании задач модель была доработана для учета глубины дна и его влияния на результаты гидродинамических расчётов. На рис. 3 показана дискретизация модели объекта в водной среде. Сетка накладывалась с учетом пристеночных слоев с использованием сеточной функции inflation. Построение сетки осуществлялось алгоритмом CutCell. Модель расчётной области состояла из ячеек в форме гексаэдра.

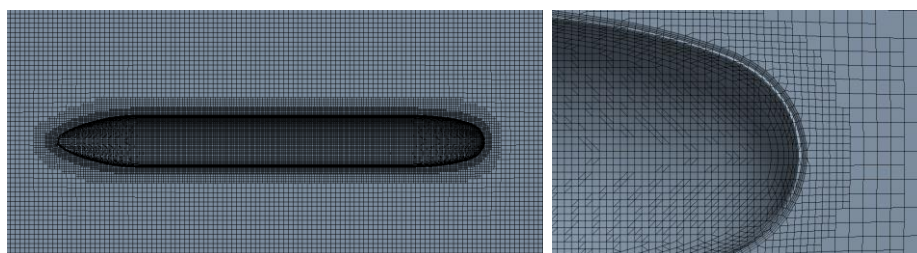


Рис. 3. Дискретная модель объекта в водной среде

Расчеты выполнялись в стационарном решателе stationary с применением моделей Volume of Fluid и k-ε – модели турбулентности. На рис. 4 представлена граница раздела сред. Нижняя зона расчётной области, характеризующая дно, имела тип wall. Скорость судна задавалась при помощи расхода воды Mass-flow-inlet. В верхней расчетной области находилась воздушная среда, в нижней – водная среда. Каждой среде задавались соответствующие свойства: плотность и вязкость.

Численная модель полностью повторяла параметры модельного эксперимента. Предложенный алгоритм позволял моделировать волнообразование на свободной поверхности жидкости от движения погруженного тела. Определялись давление P , полное сопротивление, из которого находились R_x , значение подъемной силы F_z и гидродинамический момент M_y . На основе полученных значений строилась зависимость вертикальной составляющей

распределения давления вдоль нижней поверхности погруженного тела в виде коэффициента $C_p = \frac{P-P_\infty}{0,5\rho u^2}$ (где ρ – плотность жидкости), зависимость коэффициента волнового сопротивления $C_w = \frac{R_w}{0,5\rho u^2 S}$ (где ρ – плотность-жидкости, S – площадь смоченной поверхности), зависимость коэффициента подъемной силы $C_F = \frac{F_z}{0,5\rho u^2 S}$ и коэффициента гидродинамического момента $C_M = \frac{M_y}{0,5\rho u^2 SL}$. При определении F_z за положительные значения принималась сила, направленная вертикально вверх и притягивающая погруженное тело к свободной поверхности жидкости, а за отрицательные значения – сила, отталкивающая тело вниз. За положительные значения M_y принимался момент, вызывающий дифферент судна на корму, а за отрицательные – момент, вызывающий дифферент на нос.

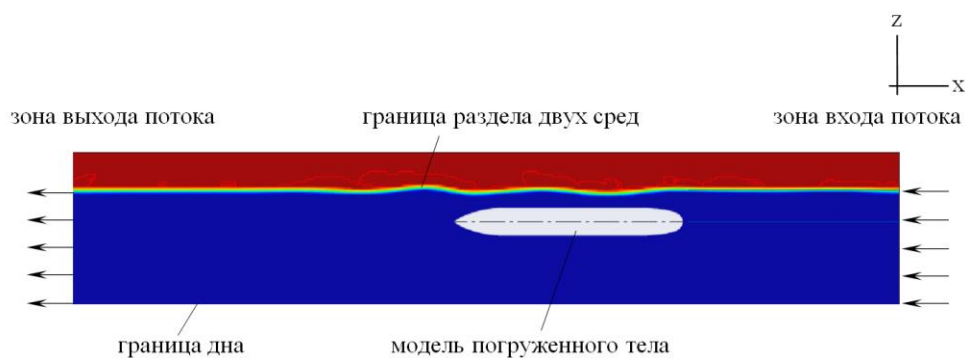


Рис. 4. Граничные условия модели

Основные результаты модельных и численных экспериментов

На первом этапе исследования для оценки работоспособности предложенного численного алгоритма было выполнено сопоставление полученных результатов модельных экспериментов и теоретических расчетов значений относительной величины максимальной высоты поверхностных волн H/L (рис. 5). Из рисунка следует, что для обоих выбранных заглублений получена достаточно хорошая сходимость. Расхождения между значениями не превышали 5%. Максимальное значение H/L принимало при скорости движения тела $Fr=0,46$.

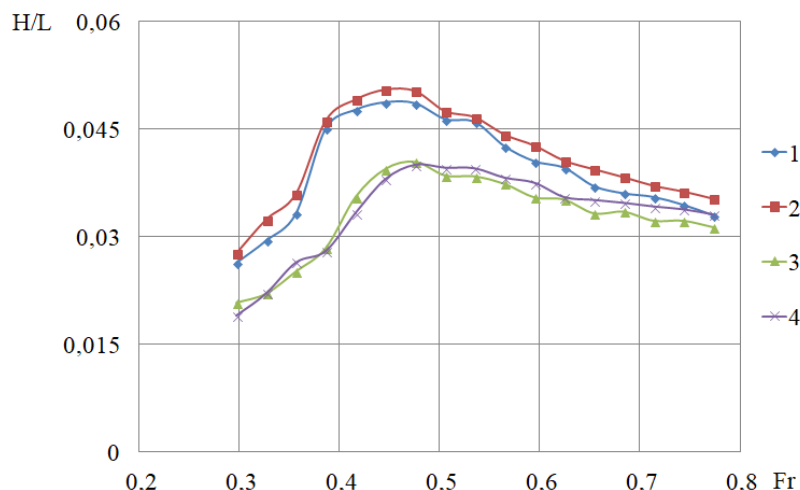


Рис. 5. Зависимости максимальных значений H/L от скорости движения погруженного тела: 1 – $h_1=1,16D$ (эксперимент); 2 – $h_1=1,16D$ (численный расчет); 3 – $h_2=1,45D$ (эксперимент); 4 – $h_2=1,45D$ (численный расчет)

Рост скорости движения приводил к изменению поля давления, окружающего тело. В результате форма профилей генерируемых поверхностных волн существенно изменялась (рис. 6). Стоит отметить, что при $0,3 < Fr < 0,51$ разница между значениями H/L и C_p для h_1 и h_2

возрастала (рис. 6 а, б). При $Fr > 0,51$ разница начинала снижаться, а второй гребень гравитационной волны значительно смещался за кормовую оконечность погруженного тела (рис. 6 в). Чаша прогиба с ростом числа Fr смещалась от мидель-шпангоута при $Fr=0,36$ до кормового перпендикуляра при $Fr=0,6$, в кормовую оконечность при более высоких скоростях. Разница между значениями H/L и C_p для h_1 и h_2 при $Fr > 0,65$ становилась крайне незначительной (рис. 6 г). Смещение фазы гравитационной волны происходило в результате смещения области пониженного давления в корму тела (рис. 6).

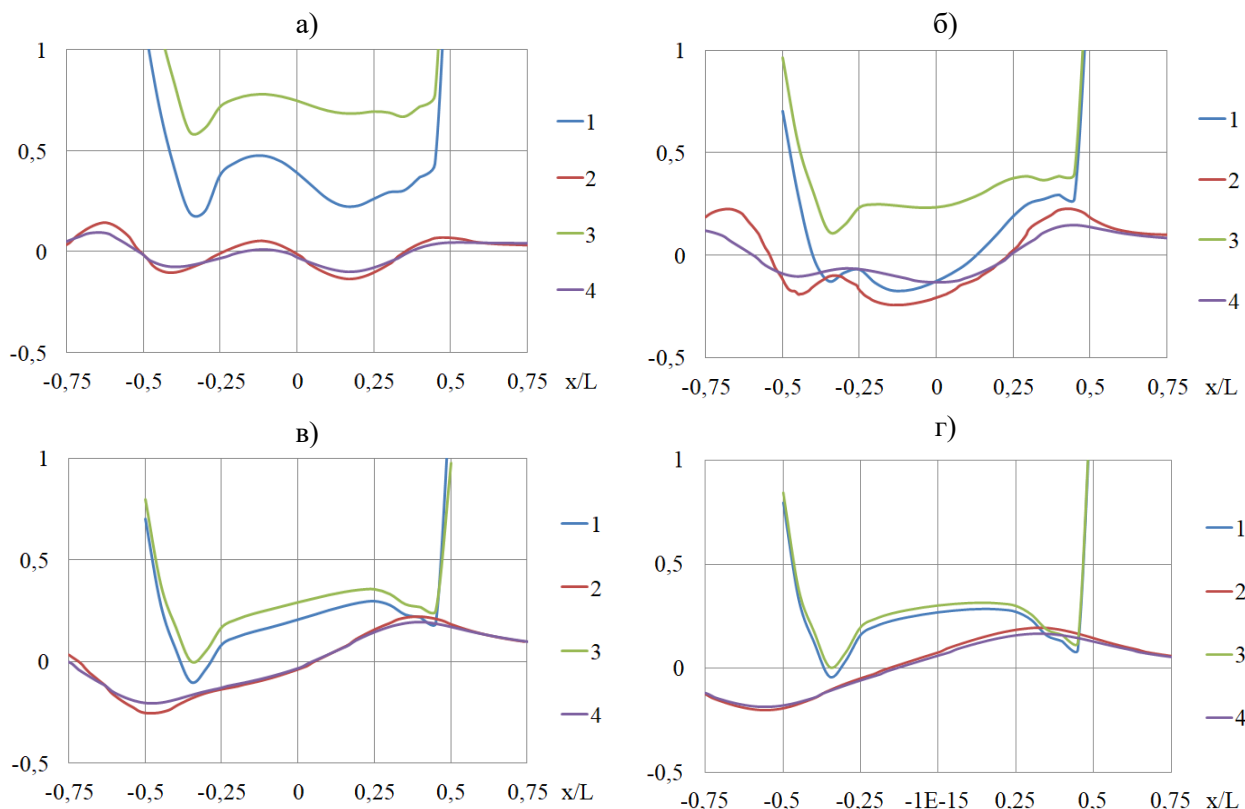


Рис. 6. Сопоставление значений коэффициента C_p и профилей гравитационных волн для различных скоростей движения модели (а – $Fr=0,3$; б – $Fr=0,39$; в – $Fr=0,51$; г – $Fr=0,65$): 1 – C_p ($h_1=1,16D$); 2 – $H/L \cdot 10$ ($h_1=1,16D$); 3 – C_p ($h_2=1,45D$); 4 – $H/L \cdot 10$ ($h_2=1,45D$)

Результаты численного моделирования показали, что движение в условиях малой глубины акватории ($H_b=2,9D$) приводило к значительному росту значения коэффициента волнового сопротивления C_w по сравнению с данными для глубокой воды ($H_b=7,5D$), особенно это было заметно в диапазоне скоростей $0,33 < Fr < 0,51$ (рис. 7). Изменялся характер волнообразования, а значение критической скорости волнового сопротивления, то есть скорости, при которой C_w приобретало максимальные значения, сдвигалось в область меньших скоростей $Fr=0,42$ при $h_1=1,16D$ и $Fr=0,45$ при $h_2=1,45D$ по сравнению со случаем большой глубины дна $Fr=0,45$ и $Fr=0,48$ соответственно.

Неравномерное распределение давления по верхней и нижней поверхностям погруженного тела приводило к возникновению вертикальной подъемной силы F_z , которая оказывала значительное влияние на характер движения тела. Численные эксперименты показали, что при скорости движения погруженного тела $u \rightarrow 0$ значение C_F стремится к ненулевому значению C_{F0} , что согласуется с результатами работы [15]. Поэтому на рис. 8 изображены зависимости коэффициента C_F за вычетом значения C_{F0} , а также приведены значения для случая $H_b=7,5D$.

Как и для коэффициента волнового сопротивления, наблюдалось резкое увеличение значений $C_F - C_{F0}$ ($H_b=2,9D$) в области локального максимума при $Fr=0,39$ по сравнению с $C_F - C_{F0}$ ($H_b=7,5D$) при $h_1=1,16D$ (рис. 8). В случае малой глубины дна подъемная сила действовала

значительно сильнее, что также подтверждается экспериментальными зависимостями относительного перемещения h^* модели тела при движении с различной скоростью (рис. 9). При $h_2=1,45D$ значения C_F-C_{F0} при скоростях $0,3 < Fr < 0,39$ для всех случаев различались незначительно. При $0,39 < Fr < 0,77$, когда погруженное тело начинало смещаться вниз от поверхности жидкости, наличие дна оказывало существенное влияние на величины C_F-C_{F0} и h^* . Значения исследуемых параметров возрастали.

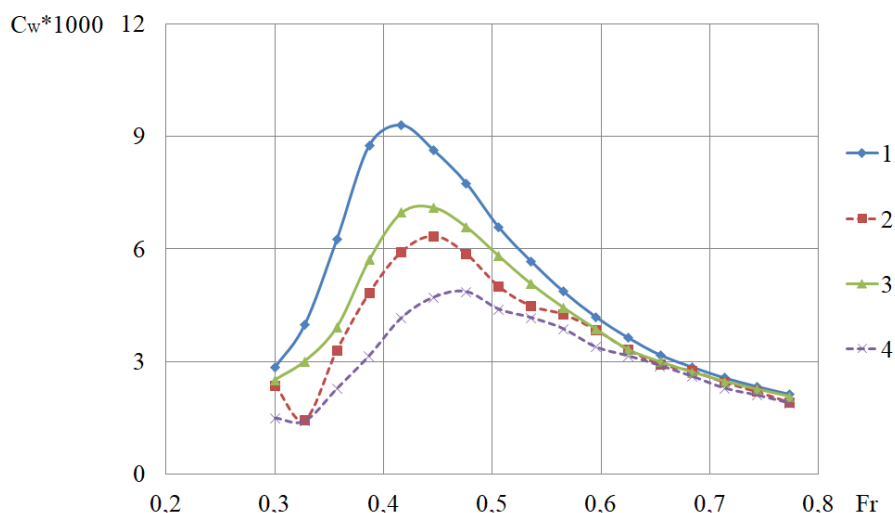


Рис. 7. Зависимости коэффициента волнового сопротивления от скорости движения погруженного тела:
 1 – C_w при $h_1=1,16D$ ($H_b=2,9D$); 2 – C_w при $h_1=1,16D$ ($H_b=7,5D$); 3 – C_w при $h_2=1,45D$ ($H_b=2,9D$); 4 – C_w при $h_2=1,45D$ ($H_b=7,5D$)

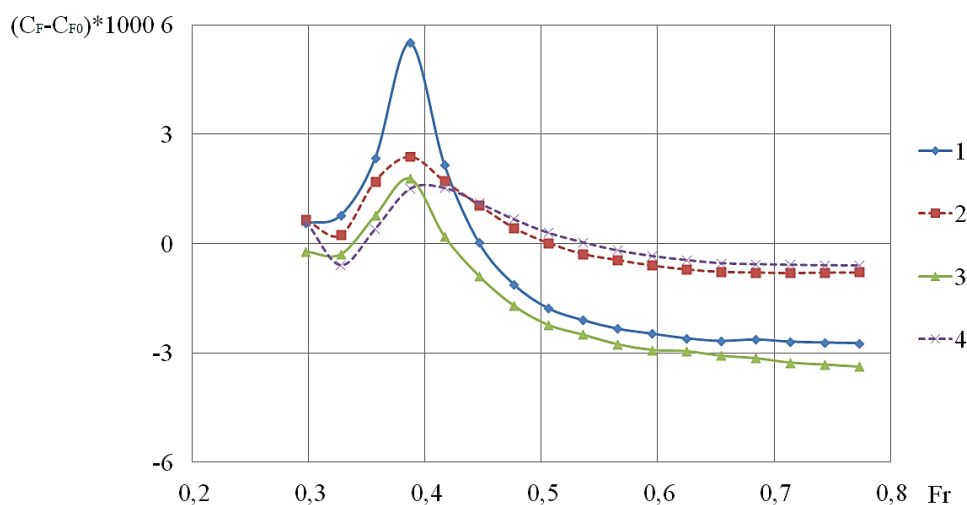


Рис. 8. Зависимости коэффициента подъемной силы от скорости движения погруженного тела:
 1 – C_F-C_{F0} при $h_1=1,16D$ ($H_b=2,9D$); 2 – C_F-C_{F0} при $h_1=1,16D$ ($H_b=7,5D$); 3 – C_F-C_{F0} при $h_2=1,45D$ ($H_b=2,9D$); 4 – C_F-C_{F0} при $h_2=1,45D$ ($H_b=7,5D$)

Анализ кривых показал, что при $Fr \approx 0,38$ положение локального максимума C_F-C_{F0} соответствовало максимальному значению h^* . В этом случае расстояние между моделью и свободной поверхностью воды было минимальным, кормовая оконечность погруженного тела практически контактировала с поверхностью воды, проявлялся дифферент на носовую оконечность. Значение $h^*=0$ соответствовало первоначально заданной величине заглубления модели. Из полученных результатов видно, что изменение подъемной силы и относительного заглубления в момент ее воздействия при движении тела с различной скоростью имело сложный характер и достигало значительных величин.

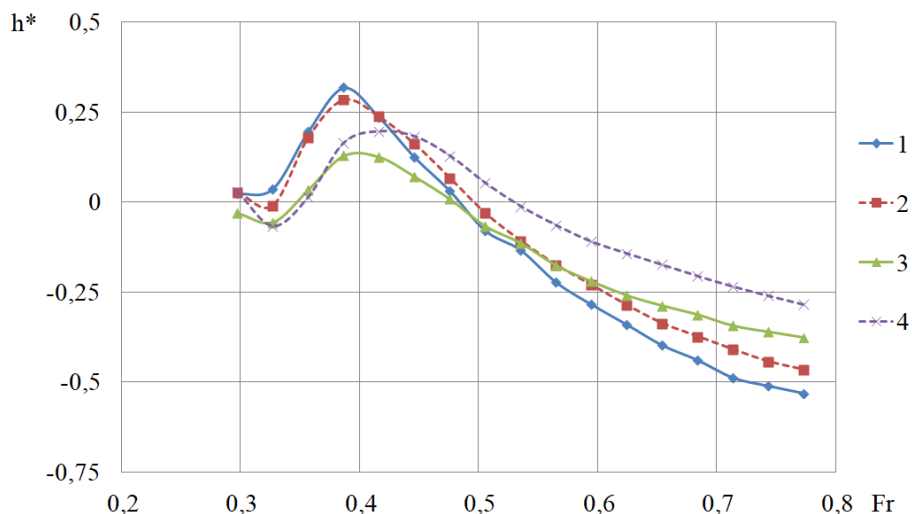


Рис. 9. Зависимости относительного вертикального перемещения модели погруженного тела от скорости движения:
 1 – h^* при $h_1=1,16D$ ($H_b=2,9D$); 2 – h^* при $h_1=1,16D$ ($H_b=7,5D$); 3 – h^* при $h_2=1,45D$ ($H_b=2,9D$);
 4 – h^* при $h_2=1,45D$ ($H_b=7,5D$)

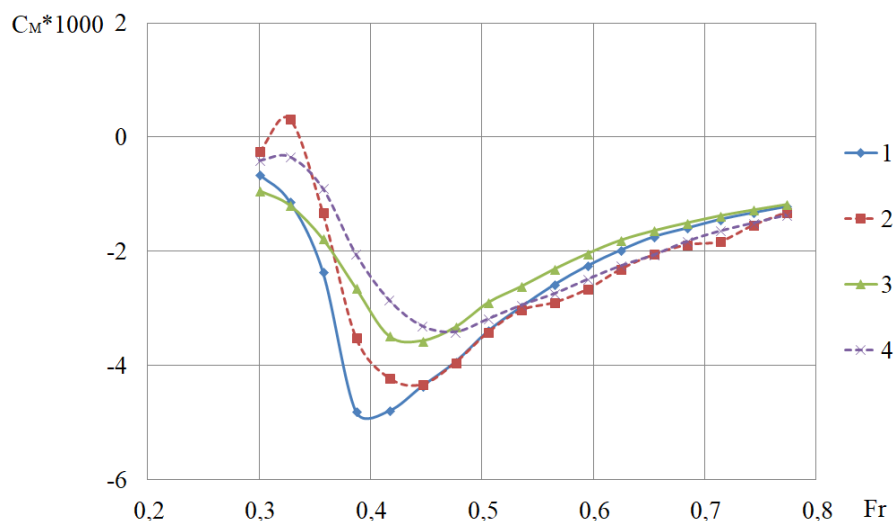


Рис. 10. Зависимости коэффициента гидродинамического момента модели погруженного тела от скорости движения:
 1 – C_M при $h_1=1,16D$ ($H_b=2,9D$); 2 – C_M при $h_1=1,16D$ ($H_b=7,5D$); 3 – C_M при $h_2=1,45D$ ($H_b=2,9D$);
 4 – C_M при $h_2=1,45D$ ($H_b=7,5D$)

С ростом скорости движения тела менялся и гидродинамический момент M_y . На рис. 10 показан сложный характер зависимостей коэффициента C_M . Локальный максимум, который виден для глубины дна $H_b=7,5D$ при $Fr=0,33$, для случая $H_b=2,9D$ не наблюдался, очевидно, смещаясь в сторону меньших значений Fr . По этой же причине в экспериментах дифферент судна на корму фиксировался только для $H_b=7,5D$. При $H_b=2,9D$ значения M_y приобретали отрицательный знак уже при $Fr=0,3$. Для обоих заглублений наблюдалось движение модели тела с дифферентом на нос. Максимальные отрицательные значения C_M для малой глубины дна фиксировались при скоростях движения $Fr=0,39$ ($h_1=1,16D$) и $Fr=0,45$ ($h_2=1,45D$), а для $H_b=7,5D$ – при $Fr=0,45$ и $Fr=0,48$ соответственно. При $Fr>0,6$ характер кривых и значения C_M практически совпадали (рис. 10).

Заключение

Предложено численное решение, разработанное на базе программного комплекса ANSYS 19 R2 Academic Research, позволяющее определять силы и моменты действующей на

погруженное тело ассиметричной формы круглого сечения с цилиндрической вставкой и относительным удлинением $L^*=8,4$ при его движении вблизи свободной поверхности жидкости с различной скоростью при ограниченной глубине дна. Работоспособность алгоритма проверена путем сопоставления полученных результатов с данными модельных экспериментов.

Получены зависимости коэффициентов волнового сопротивления, подъемной силы и гидродинамического момента от скорости движения и заглубления погруженного тела для малой глубины акватории $H_b=2,9D$. Экспериментально определена величина относительного перемещения тела, возникающего под воздействием F_z . Определено влияние глубины дна на характер полученных зависимостей, выполнено сопоставление результатов с данными для глубокой воды $H_b=7,5D$. Показано, что максимальные значения C_w , C_F-C_{F0} и C_M существенно увеличиваются при движении тела в условиях малой глубины, а их пики смещаются в сторону меньших скоростей.

Дальнейшим направлением исследования является определение влияния на исследуемые параметры сил и моментов наличия сплошного ледяного покрова на поверхности воды при движении тела с различной скоростью в условиях ограниченной глубины акватории.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00118).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М. Влияние подъемной силы на характер движения погруженного тела в приповерхностной водной среде // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 2(47). С. 3–12. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-2-12
2. Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М. Движение погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 4(45). С. 16–25. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-4-2
3. Земляк В.Л., Козин В.М. Ледовый бассейн лаборатории ледотехники // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2021. № 1(42). С. 19–31. DOI: 10.24412/2227-1384-2021-142-19-31
4. Broglia R., Di Mascio A., Muscari R. Numerical study of confined water effects on self-propelled submarine in steady manoeuvres. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 2007;17(2):89–96.
5. Dawson E. An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-diameter ratio on the near-surface operation of conventional submarines. Ph.D. Thesis. University of Tasmania, Hobart, Australia, 2014. 214 p. URL: <https://eprints.utas.edu.au/22368/1/Whole-Dawson-thesis.pdf> – 26.07.2022.
6. Divsalar K. Improving the hydrodynamic performance of the SUBOFF bare hull model: a CFD approach. *Acta Mechanica Sinica*. 2020;36(1):44–56. DOI: 10.1007/s10409-019-00913-7
7. Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C. On transition from laminar to turbulent flow. *Journal of Applied Physics*. 1957;28(4):388–394. DOI: 10.1063/1.1722760
8. Jagadeesh P., Murali K. RANS predictions of free surface effects on axisymmetric underwater body. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2010;4(2):301–313. DOI: 10.1080/19942060.2010.11015318
9. Lighthill J.M. *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, 1978. 504 p.
10. Maali M.A., Esperança P.T., Vitola M.A. et al. How does the free surface affect the hydrodynamics of a shallowly submerged submarine? *Applied Ocean Research*. 2018;76:34–50. DOI: 10.1016/j.apor.2018.04.008
11. Mansoorzadeh S., Javanmard E. An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (AUV) using computational and experimental fluid dynamics methods. *Journal of Fluids and Structures*. 2014;51:161–171. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2014.09.001
12. Nematollahi A., Davvand A., Dawoodian M. An axisymmetric underwater vehicle free surface interaction: a numerical study. *Ocean Engineering*. 2015;96:205–214. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.12.028

13. Raphaël E., De Gennes P.-G. Capillary gravity waves caused by a moving disturbance: wave resistance. *Physical Review E*. 1996;53(4):3448. DOI: 10.1103/PhysRevE.53.3448
14. Salari M., Rava A. Numerical investigation of hydrodynamic flow over an AUV moving in the water-surface vicinity considering the laminar-turbulent transition. *Journal of Marine Science and Application*. 2017;16(3):298–304. DOI: 10.1007/S11804-017-1422-X
15. Sturova I.V. The effect of a crack in an ice sheet on the hydrodynamic characteristics of a submerged oscillating cylinder. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2015;(79):170–178. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2015.07.008

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 4/53
Theory of the Ship and Construction Mechanics

www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/13-22>

Zemlyak V., Vasilyev A., Kozin V., Chingalae V.

VITALIY L. ZEMLYAK, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, vellkom@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3218-5738>

ALEXEY S. VASILYEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, vasil-grunt@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7783-0000>

SERGEY A. CHINGALAEV, Postgraduate Student, vellkom@list.ru

Department of Technical Disciplines
Sholom-Aleichem Priamursky State University
 Birobidzhan, Russia

VICTOR M. KOZIN, Doctor of Engineering Sciences, Professor, vellkom@list.ru

Chief Researcher of the Laboratory for Problems of Creation
 and Processing of Materials and Products
Institute of Machine Science and Metallurgy FEB RAS
 Komsomolsk-on-Amur, Russia

Movement of an immersed body in a near-surface water environment at a shallow bottom

Abstract. The forces and moments, acting on an immersed body from the side of the liquid, have a significant effect on the nature of its motion. The depth of the water area, in which the body moves, can have a significant influence on the parameters under consideration. Despite the importance of studying these parameters, which are responsible for the safety and maneuverability of an underwater vehicle, there are practically no theoretical and especially experimental works on this topic. In this article, the authors propose an algorithm developed on the basis of the ANSYS 19 R2 Academic Research software package, which allows determining the forces and moments acting on an immersed body asymmetric shape when it moves in a near-surface aquatic environment at different speeds with a limited bottom depth. The obtained results are compared with the data of model experiments. The influence of the depth of the water area on the dependences of the studied parameters has been established.

Keywords: immersed body, lifting force, hydrodynamic moment, free surface, bottom depth

For citation: Zemlyak V., Vasilyev A., Kozin V., Chingalae V. Movement of an immersed body in a near-surface water environment at a shallow bottom. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):13–22. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
 The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Kozin V.M. Influence of lifting force on the nature of motion of a submerged body in a near-surface water environment. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2021;(2):3–12. (In Russ.). DOI: 10.24866/2227-6858/2021-2-1

2. Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Kozin V.M. The movement of a submerged body near the free surface of a liquid. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2020;(4):16–25. (In Russ.). DOI: 10.24866/2227-6858/2020-4-2
3. Zemlyak V.L., Kozin V.M. Ice tank of ice technology laboratory. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. SHolom-Alejhema*. 2021;(1):19–31. (In Russ.). DOI: 10.24412/2227-1384-2021-142-19-31
4. Broglia R., Di Mascio A., Muscari R. Numerical study of confined water effects on self-propelled submarine in steady manoeuvres. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 2007;17(2):89–96.
5. Dawson E. An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-diameter ratio on the near-surface operation of conventional submarines. Ph.D. Thesis. University of Tasmania, Hobart, Australia, 2014. 214 p. URL: <https://eprints.utas.edu.au/22368/1/Whole-Dawson-thesis.pdf> – 26.07.2022.
6. Divsalar K. Improving the hydrodynamic performance of the SUBOFF bare hull model: a CFD approach. *Acta Mechanica Sinica*. 2020;36(1):44–56. DOI: 10.1007/s10409-019-00913-7
7. Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C. On transition from laminar to turbulent flow. *Journal of Applied Physics*. 1957;28(4):388–394. DOI: 10.1063/1.1722760
8. Jagadeesh P., Murali K. RANS predictions of free surface effects on axisymmetric underwater body. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2010;4(2):301–313. DOI: 10.1080/19942060.2010.11015318
9. Lighthill J.M. *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, 1978. 504 p.
10. Maali M.A., Esperança P.T., Vitola M.A. et al. How does the free surface affect the hydrodynamics of a shallowly submerged submarine? *Applied Ocean Research*. 2018;76:34–50. DOI: 10.1016/j.apor.2018.04.008
11. Mansoorzadeh S., Javanmard E. An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (AUV) using computational and experimental fluid dynamics methods. *Journal of Fluids and Structures*. 2014;51:161–171. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2014.09.001
12. Nematollahi A., Dadvand A., Dawoodian M. An axisymmetric underwater vehicle free surface interaction: a numerical study. *Ocean Engineering*. 2015;96:205–214. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.12.028
13. Raphaël E., De Gennes P.-G. Capillary gravity waves caused by a moving disturbance: wave resistance. *Physical Review E*. 1996;53(4):3448. DOI: 10.1103/PhysRevE.53.3448
14. Salari M., Rava A. Numerical investigation of hydrodynamic flow over an AUV moving in the water-surface vicinity considering the laminar-turbulent transition. *Journal of Marine Science and Application*. 2017;16(3):298–304. DOI: 10.1007/S11804-017-1422-X
15. Sturova I.V. The effect of a crack in an ice sheet on the hydrodynamic characteristics of a submerged oscillating cylinder. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2015;(79):170–178. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2015

Проектирование и конструкция судов

Научная статья

УДК 629.5.075

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/23-31>

А.А. Гутник, С.О. Климов, А.П. Герман

ГУТНИК АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ – старший преподаватель, gutnik.aa@dvfu.ru

GERMAN ANDREY PETROVICH – старший преподаватель, german.ap@dvfu.ru,

<http://orcid.org/0000-0002-9530-5258>

Отделение машиностроения, морской техники и транспорта

Инженерного департамента Политехнического института

Дальневосточный федеральный университет

КЛИМОВ СЕРГЕЙ ОЛЕГОВИЧ – руководитель группы мореходных качеств, liminid@mail.ru

ООО «ВладСудоПроект»

Владивосток, Россия

Способ снятия судна с илистого грунта

Аннотация. Разработана методика решения задач прогнозирования деформированной формы пластины с испоПри посадке судна на илистый грунт возможно появление эффекта прилипания. Если вовремя не устранить данный эффект, то судно может быть затоплено приливом. В статье предлагается метод по определению силы удержания на грунте. Показана возможность использования силы избыточного поддержания (сила плавучести), появляющейся при сверхнормативном погружении судна выше грузовой ватерлинии, и метод её определения для конкретного случая нагрузки судна. Исследована взаимосвязь сил удержания на грунте при различной его липкости с учетом проседания корпуса судна в грунт и сил избыточного поддержания. Составлен график необходимого процента уменьшения площади соприкосновения корпуса судна с грунтом для обеспечения всплытия судна (нивелирования эффекта прилипания) за счет силы избыточного поддержания. Предложены конструктивные и организационные мероприятия и меры по обеспечению снятия судна с грунта. Составлены рекомендации и представлена последовательность действий при снятии судна с грунта методом промывки или продувки корпуса судна.

Ключевые слова: осушение на грунте, снятие с грунта, илистый грунт, силы поддержания, эффект прилипания, липкость

Для цитирования: Гутник А.А., Климов С.О., Герман А.П. Способ снятия судна с илистого грунта // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 22–23.

Введение

Для проведения грузовых операций довольно широко используются суда, осушаемые на грунте. Особенно это характерно для устьев рек и районов, где наблюдаются приливы с резкими перепадами уровня воды. Такая практика как наиболее рациональный путь доставки припасов, оборудования и грузов используется и особенно важна для освоения удаленных регионов России – Дальнего Востока и Крайнего Севера [1].

В районах с большими перепадами уровня воды в результате приливов и отливов судно, вставая на грунт, осушается полностью [2]. В районах с илистым грунтом судно при постановке на грунт в результате адгезии может к нему «прилипнуть». Если вовремя не устранить данный эффект и не снять судно с грунта, то в случае прилива, если высота подъема воды будет выше борта судна, оно может быть затоплено. Особенно сильный эффект прилипания

будет наблюдаться на судах с плоским днищем из-за большей площади контакта грунта с корпусом судна.

Цель данной работы – предложить конструктивные и организационные мероприятия по очистке корпуса судна от грунта. Для достижения поставленной цели прежде всего необходимо:

- определить зависимость сил удержания на грунте от площади днища и бортов судна, подвергающихся адгезии при различной липкости грунта;

- выявить необходимый процент минимального уменьшения площади контакта судна с грунтом, дающий возможность всплытия судна для грунтов с различной липкостью, при различных осадках. Необходимо отметить, что в качестве объекта исследования выбран упрощенный прямоугольный понтон. Рассмотрены и учитываются не сумма сил, а только силы прилипания. Так как представлена только сама концепция, производительность и мощность насосов на данном этапе исследования не рассматривались.

Определение сил удержания на грунте

Силы удержания на грунте зависят от липкости грунта и площади его соприкосновения с корпусом судна. Липкость грунта – способность грунта при определенной влажности прилипать к поверхности различных предметов. Классификации грунтов [4] и глинистых грунтов [3] по липкости приведены в табл. 1 и 2.

По сравнению с липкостью глинистых грунтов липкость песков и супесей ничтожна и изменяется от 20–30 до 500–550 г/см² (наиболее часто 50–200 г/см²).

Таблица 1

Классификация липкости грунтов

Грунты	Величина липкости, г/см ²
Очень слабо-липкие	0,2
Слабо-липкие	0,5
Липкие	1,0
Средней липкости	2,0
Сильно-липкие	5,0

Таблица 2

Классификация липкости глинистых грунтов

Глинистые грунты	Величина липкости, г/см ²
Неприлипаемые	$q < 50$
Слабо-прилипаемые	$50 < q < 100$
Средне-прилипаемые	$100 < q < 250$
Сильно-прилипаемые	$q > 250$

Расчеты произведены для гипотетического прямоугольного понтона со следующими характеристиками:

длина L, м	60	осадка (для D) T, м	2,5
ширина B, м	20	полное водоизмещение D, т	3075
надводный борт f, м	1,5	осадка (для D ₀) T, м	1,5
высота борта, м	4	водоизмещение порожнем D ₀ , т	1845.

Силу удержания на грунте можно определить по формуле (кН):

$$F_{уд} = q \cdot S \cdot g,$$

где q – липкость грунта, т/м²;

S – площадь соприкосновения корпуса судна с грунтом, м²;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Представлен расчет сил удержания на грунте в зависимости от глубины проседания корпуса судна в грунт и его липкости (табл. 3).

Таблица 3

Расчет сил удержания на грунте

Глубина увязания в грунте h , м	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	
S бортов и стенок, m^2	0,0	8,0	16,0	24,0	32,0	40,0	48,0	56,0	64,0	72,0	80,0	
S общ., m^2	1200,0	1208,0	1216,0	1224,0	1232,0	1240,0	1248,0	1256,0	1264,0	1272,0	1280,0	
	$F_{уд}$, кН											
Липкость, $г/м^2$	15,0	176580	177757	178934	180112	181289	182466	183643	184820	185998	187175	188352
	13,0	153036	154056	155076	156097	157117	158137	159157	160178	161198	162218	163238
	11,0	129492	130355	131219	132082	132945	133808	134672	135535	136398	137262	138125
	9,0	105948	106654	107361	108067	108773	109480	110186	110892	111599	112305	113011
	7,0	82404	82953	83503	84052	84601	85151	85700	86250	86799	87348	87898
	5,0	58860	59252	59645	60037	60430	60822	61214	61607	61999	62392	62784
	3,0	35316	35551	35787	36022	36258	36493	36729	36964	37200	37435	37670
	1,0	11772	11850	11929	12007	12086	12164	12243	12321	12400	12478	12557
	0,80	9418	9480	9543	9606	9669	9732	9794	9857	9920	9983	10045
	0,60	7063	7110	7157	7204	7252	7299	7346	7393	7440	7487	7534
	0,40	4709	4740	4772	4803	4834	4866	4897	4929	4960	4991	5023
	0,20	2354	2370	2386	2401	2417	2433	2449	2464	2480	2496	2511
	0,10	1177	1185	1193	1201	1209	1216	1224	1232	1240	1248	1256

Определение сил избыточного поддержания

В противовес силам присасывания можно поставить избыточную силу поддержания, возникающую при принудительном погружении судна выше грузовой ватерлинии, при данной загрузке судна и равной (кН):

$$F_{и.п.} = \gamma \cdot (V_1 - V) \cdot g,$$

где γ – плотность воды, $г/см^3$;

V_1 – объемное водоизмещение при действующей осадке судна, $м^3$;

V – объемное водоизмещение при наибольшей осадке судна, $м^3$;

g – ускорение свободного падения, $м/с^2$.

Расчетные данные представлены в табл. 4, где $\Delta T_{и.п.}$ – величина превышения наибольшей осадки судна при определенной загрузке.

Однако следует помнить, что сверхнормативное погружение судна опасно, вплоть до гибели судна, если к моменту, когда уровень воды достигнет высоты борта судна, сила удержания не сравняется с силой избыточного поддержания. Поэтому целесообразно оставлять некий запас плавучести, в данном примере равный 1 м.

Таблица 4

Зависимость силы избыточного поддержания от сверхнормативного погружения судна

$F_{и.п.}$, кН	0	3620	7240	10860	14480	18099	21719	25339	28959	33786
$\Delta T_{и.п.}$, м	0	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,80

Определение взаимосвязи силы удержания на грунте и силы избыточного поддержания

Используя соответствующие расчеты, можно построить график зависимости силы избыточного поддержания и силы удержания на грунте от глубины проседания судна в грунте и его липкости (рис. 1). Точка пересечения силы избыточного поддержания и силы удержания характеризует точку, при которой судно должно всплыть за счет избыточной силы поддержания.

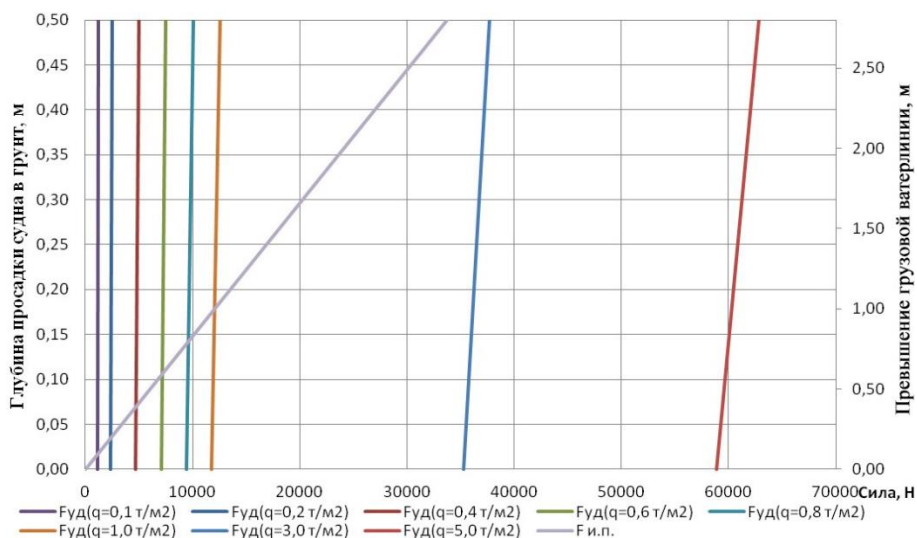


Рис. 1. График зависимости силы избыточного подержания и сил удержания на грунте от глубины просадки судна в грунте и его липкости

Представлены графики сил удержания при уменьшении площади соприкосновения корпуса судна и грунта на 75%, 50% и 25% для некоторых липкостей (рис. 2).

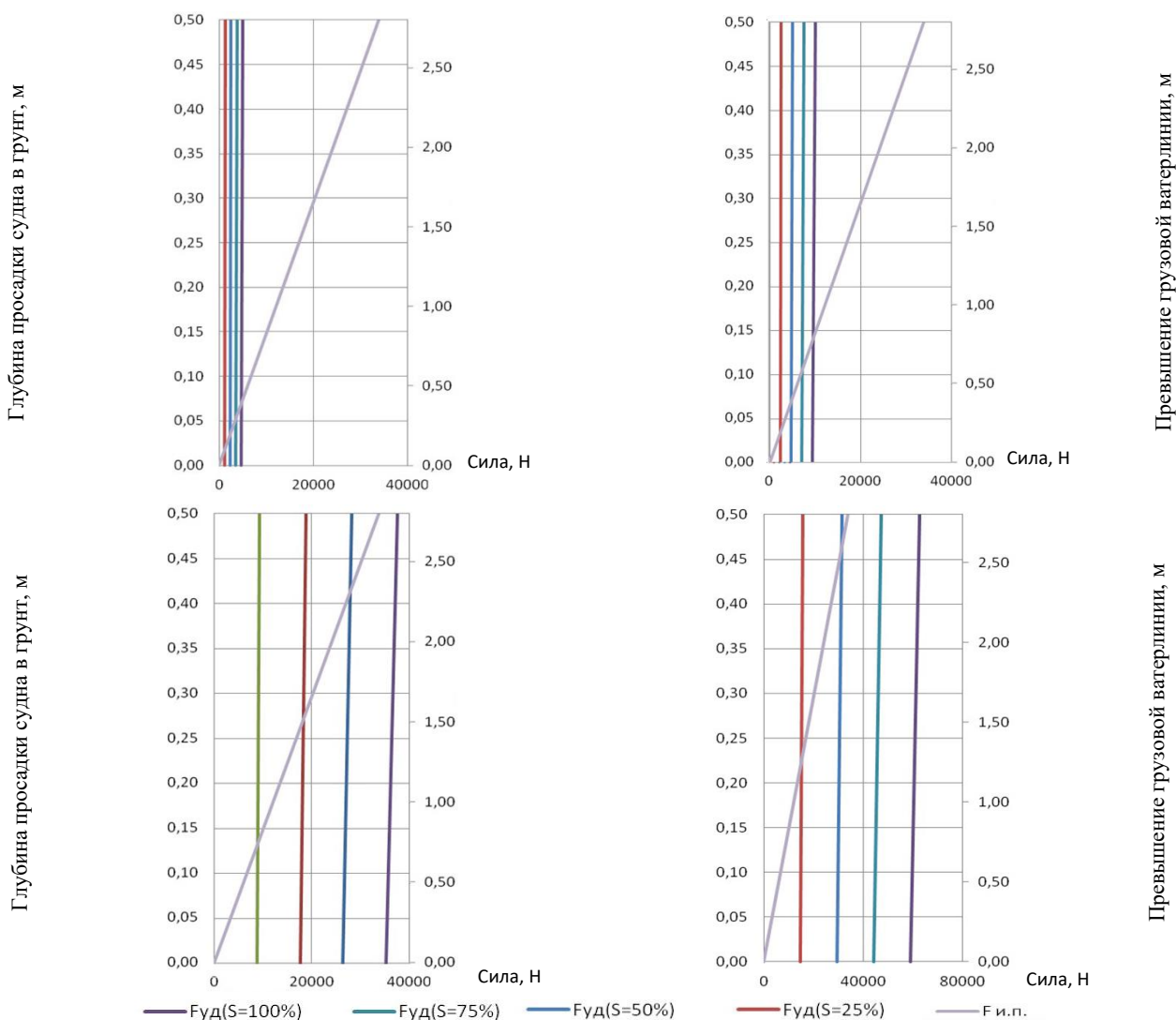


Рис. 2. Графики зависимости силы удержания при уменьшении площади соприкосновения корпуса судна и грунта при липкости, г/см²: а – 40; б – 80; в – 300; з – 500

На графике с данными по необходимому проценту уменьшения площади соприкосновения ($S\%$) корпуса судна с грунтом при приращении избыточной осадки на 0,5 и 1,5 м и различном проседании корпуса судна в грунт верхние кривые характеризуют рекомендованное предельное положение погружения для судна в полном грузу при $T = 2,5$ м, когда запас плавучести составляет 1 м, а величина допустимого сверхнормативного погружения – 0,5 м (рис. 3). Нижние кривые характеризуют предельное рекомендованное положение погружения для судна порожнем при $T = 1,5$ м, когда запас плавучести составляет 1 м, а величина допустимого сверхнормативного погружения – 1,5 м.

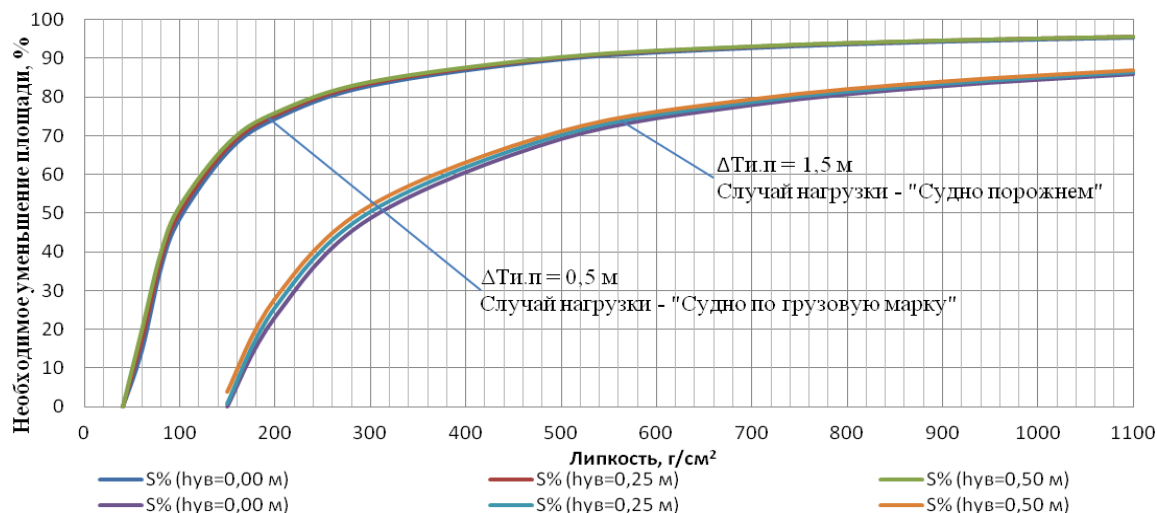


Рис. 3. Процент необходимого уменьшения площади соприкосновения корпуса судна с грунтом при приращении избыточной осадки на 0,5 и 1,5 м

Возможные конструктивные и организационные мероприятия для уменьшения площади соприкосновения корпуса судна с грунтом

Для устранения эффекта прилипания как один из вариантов может быть использована среда, нагнетаемая под давлением под днище судна. Она вытеснит ил и грунт из-под корпуса судна, уменьшив их площади соприкосновения, что ослабит или нивелирует адгезию, позволяя судну всплыть. Здесь представлены некоторые конструктивные и организационные варианты для устранения эффекта прилипания при помощи среды, нагнетаемой под давлением. Для визуализации будет использоваться плоское днище малого судна с носовой аппарелью (рис. 4).

Продувочные отверстия в корпусе

Для устранения эффекта прилипания под днище судна может нагнетаться вода или воздух через продувочные отверстия, находящиеся в днище. Для этого необходим монтаж самих отверстий с клапаном и магистрали до компрессора или насоса (рис. 4).

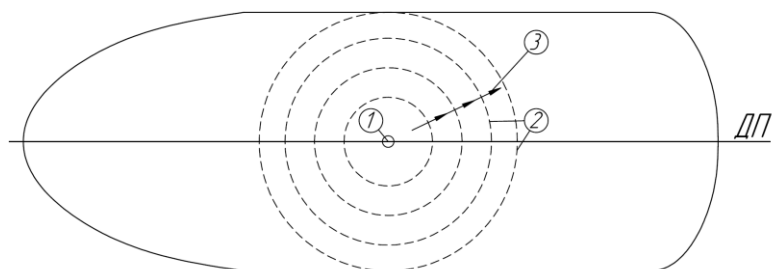


Рис. 4. Схема расположения отверстий и распространения нагнетаемой среды: 1 – выпускное отверстие; 2 – зоны распространения; 3 – линия распространения; ДП – диаметрральная плоскость

На схеме представлен идеализированный случай, при котором скорости распространения среды по всем направлениям от центра выпускных отверстий равны. На самом деле скорости могут различаться, а зоны распространения, ввиду наличия неровностей дна и грунта, камней, взвесей и ила различной плотности на разных участках, по форме будут отличаться от круга.

При нагнетании среды под давлением под днище она начнет вытеснять суспензию от центра распространения. Когда среда вытеснит последний слой суспензии по периметру плоской части дна, произойдут прорыв нагнетаемой подушки и резкая потеря давления. В этот момент площадь соприкосновения дна судна и грунта будет минимальной.

При наличии одного отверстия для контура, представленного на рис. 4, уменьшение площади соприкосновения дна и ила составит 33%. При наличии двух отверстий для такого же контура уменьшение площади соприкосновения дна и ила составит уже 65%; трех – 89% (рис. 5 а, б). Если количество отверстий увеличить до 11 и расположить их симметрично, то уменьшение площади соприкосновения дна и ила составит уже 93% (рис. 5в). При увеличении количества отверстий от 3 до 11 (почти в 4 раза), разница между величинами уменьшения площади соприкосновения дна и грунта составит лишь 4%.

Однако при сравнении рисунков 5б и 5в можно заметить, что площадь зоны давлений, созданная одним отверстием, уменьшится примерно в 3 раза, или на 67%. Пропорционально площади уменьшится и давление, особенно в районах, наиболее удаленных от отверстий распространения (по периметру контура судна). Так, при меньшем давлении, ввиду неоднородности суспензии (ила и взвесей), фигура зоны распространения будет значительно отличаться от круга и приблизится к коридору, по которому среда вытеснения по пути наименьшего сопротивления дойдет до края контура и прорвет его; при этом уменьшение площади соприкосновения корпуса судна и суспензии будет минимальным.

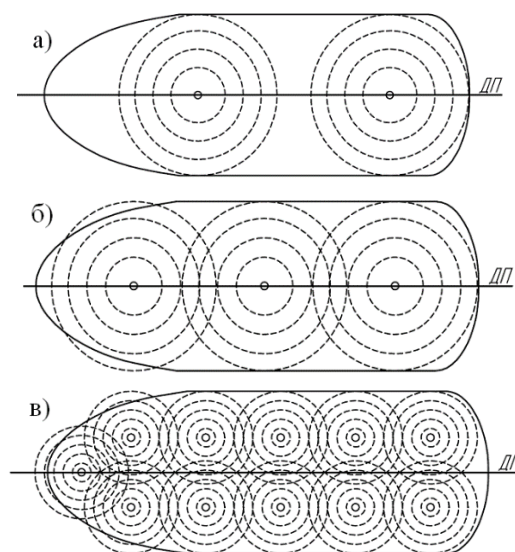


Рис. 5. Схема расположения отверстий и распространения нагнетаемой среды: а – 2 отверстия; б – 3 отверстия; в – две линии отверстий (11 шт.)

Поэтому расположение продувочных отверстий, как на рис. 5в, более рационально. При таком расположении продувочных отверстий коридоры отверстий непременно будут пересекаться, что уменьшит площадь соприкосновения дна корпуса судна и ила и в достаточной степени ослабит адгезию, позволяя судну всплыть.

Исходя из вышесказанного необходимы исследования по определению количества отверстий, мест их расположения, начального давления, при которых будет наблюдаться наибольший эффект при минимальных затратах и конструктивных изменениях. Так как необходимо производить монтаж для каждого отверстия и магистрали, в целях обеспечения большего начального давления следует увеличивать мощность насосов или компрессоров.

Предлагаемые конструкция и компоновка продувочного отверстия (рис. 6) показывают, что необходимо обеспечить возможность поворота насадки вокруг вертикальной оси для более результативной промывки корпуса. Купол необходим для защиты насадки при посадке судна на грунт.

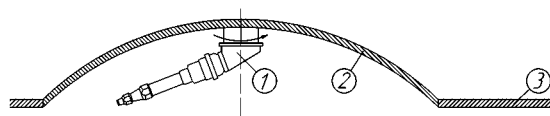


Рис. 6. Конструкция продувочного отверстия:
1 – управляемая насадка; 2 – монтируемый купол; 3 – днище судна

Организационные мероприятия

Продувка корпуса может производиться и без монтажа продувочных отверстий в днище судна. Для этого необходимы компрессор или насос, а также несколько гибких рукавов, желательно с телескопической насадкой, для более дальнего размещения точки распространения среды к диаметральной плоскости (ДП) судна (рис. 7).

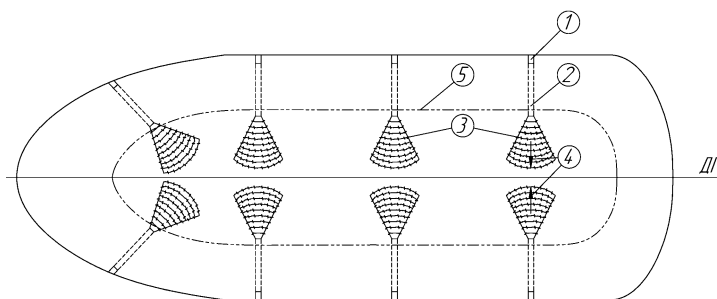


Рис. 7. Схема гибких рукавов и зон распространения нагнетаемой среды:
1 – конец гибкого рукава; 2 – телескопическая насадка; 3 – начальная зона распространения среды; 4 – начальное направление распространения среды; 5 – результирующая область образовавшейся подушки

Концы рукавов заводятся под днище судна таким образом, чтобы они были направлены к ДП. После заводки рукавов начинается процесс нагнетания среды под днище судна. Так как насадки всех рукавов направлены к ДП, то и первичная зона вытеснения будет распространяться в первую очередь именно к ДП. После соединения областей от разных рукавов образуется общая зона вытеснения, которая впоследствии будет распространяться к краю контура днища.

Преимуществом данного способа является направленность создания первичной зоны вытеснения, позволяющая освободить большую площадь днища судна от ила до момента прорыва подушкой контура днища. Минусом же являются сложность выполнения работ с борта судна, сложность заводки концов рукавов под днища и выбор их ориентации.

Рукава можно хранить на борту судна и использовать лишь при необходимости, что влечет за собой наличие подготовительного этапа развертки рукавов и удлинение всей операции по снятию судна с илистого грунта.

Для осуществления промывки корпуса необходимо, чтобы средняя скорость воды была больше, чем представленная в табл. 5.

Таблица 5

Средняя скорость воды

Порода грунта	Размер частиц грунта, мм	Средняя скорость воды, м/с
Ил	До 0,05	0,3
Песок мелкий	0,02–0,25	0,4
Песок средний	0,25–1,0	0,7
Песок крупный	1,0–2,5	0,8
Гравий мелкий	2,5–5,0	0,9
Гравий средний	5,0–10	1,2

Показанные скорости характеризуют величину, при которой начинается размывка грунта. Скорость же вытеснения зависит от скорости истекания, диаметра выпускных отверстий и их количества. Можно говорить, что объем грунта, вытесненный в единицу времени, равен суммарному объему расхода среды всех выпускных отверстий в эту же единицу времени.

Зная величину необходимого процента уменьшения площади соприкосновения корпуса судна с грунтом и высоту канала промывания, можно рассчитать производительность насосов для обеспечения промывки с учетом времени прилива и с учетом запаса по времени.

Рекомендации и последовательность действий при снятии судна с грунта методом продувки корпуса судна

На судне должны быть график зависимости площади контакта корпуса судна с грунтом в зависимости от его просадки в грунт и график сил удержания на грунте в зависимости от его липкости и площади контакта.

Последовательность действий при снятии судна:

- а) проведение изысканий по определению предполагаемой липкости грунта в предполагаемом месте посадки судна на грунт, в зависимости от его влажности, погодных условий и времени года;
- б) операции по посадке судна на грунт;
- в) проверка целостности наружной обшивки;
- г) экспериментальное, приблизительное определение липкости грунта после осуществления операций по осушению судна;
- д) определение просадки судна в грунт по маркам углубления;
- е) расчет необходимой минимальной площади уменьшения контакта корпуса судна с грунтом;
- ж) подготовка устройств и систем для промывки корпуса судна;
- з) обеспечение водонепроницаемости наружной обшивки, верхней палубы;
- и) осуществление промывки корпуса судна.

Промывку рационально начинать при приливе в целях использования забортной воды. Также вода будет способствовать уменьшению площади контакта судна с грунтом.

Заключение

На основе рисунков 1 и 3 можно говорить о том, что при липкостях до 50 г/см^2 в случае нагрузки «судно порожнем» и при липкостях до 140 г/см^2 при нагрузке «судно по грузовую марку» судно может всплыть самостоятельно при превышении наибольшей осадки соответственно на 0,5 и 1,5 м (для данного теоретического понтона).

Полученные данные позволяют сделать вывод, что опасность для судна представляет высадка только на илистые и глинистые грунты, обладающие наибольшей липкостью. Осушения на таких грунтах следует избегать.

Детальная проработка и описание процессов функционирования предложенных механизмов возможны в дальнейших исследованиях; в данной статье даны общие конструктивные и организационные мероприятия и рекомендации по снятию судна с грунта.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Азовцев А.И., Кулеш В.А., Огай А.С., Петров В.А. Развитие судов для условий грузовых операций на необорудованных берегах Арктических и Субарктических морей // Полярная механика. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. Вып. 3. С. 450–460.
2. Герман А.П., Кулеш В.А., Фам Ч.Х. Разработка схем усиления судна для взаимодействия с грунтом // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2020. Т. 12, №5. С. 915–925. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-915-925

3. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. Москва: Стандартинформ, 2018.
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095052> (дата обращения: 21.06.2022).
4. Рекомендации по определению липкости грунтов в стационарных лабораторных и полевых условиях. ПНИИС Госстроя СССР. Москва: Стройиздат, 1983.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 4/53

Ship Design, Construction of Vesselswww.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/23-31>

Gutnik A., Klimov S., German A.

ALEXEY A. GUTNIK, Senior Lecturer, a_name@mail.ruANDREY P. GERMAN, Senior Lecturer, german.ap@dvfu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9530-5258>

Polytechnic Institute

*Far Eastern Federal University*SERGEY O. KLIMOV, Head of the Seaworthiness Group, liminid@mail.ru*VladSudoProject LLC*

Vladivostok, Russia

Method for removing a vessel from muddy ground

Abstract. When landing a vessel on muddy ground, a sticking effect may occur. If this effect is not eliminated in time, the ship may be flooded by the tide. The article proposes a method for determining the holding force on the ground. The possibility of using the excess support force (buoyancy force), which appears when the ship is above the load waterline, and the method of its determination for a specific case of the ship's load, is shown. The interrelation of the forces of retention on the ground at its different stickiness is studied, taking into account the subsidence of the ship's hull into the ground and the forces of excessive buoyancy. A schedule has been drawn up of the required percentage reduction in the area of contact between the ship's hull and the ground to ensure the ascent of the ship (leveling the sticking effect) due to the forces of excessive buoyancy. Proposed constructive and organizational measures and measures to ensure the removal of the ship from the ground. Recommendations are made and a sequence of actions is presented when removing the ship from the ground by washing or blowing the ship's hull.

Keywords: dewatering on the ground, removal from the ground, silty ground, support forces, buoyancy, sticking effect, stickiness, the effect of adhesion, muddy ground, muddy bottom

For citation: Gutnik A., Klimov S., German A. Method for removing a vessel from muddy ground. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):23–31. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Azovtsev A.I., Kulesh V.A., Ogay A.S., Petrov V.A. Development of vessels for cargo operations on the unequipped shores of the Arctic and Subarctic seas. *Polar Mechanics*. Vladivostok, Far Eastern Federal University, 2016. Iss. 3. P. 450–460. (In Russ.).
2. German A.P., Kulesh V.A., Pham Trung Hiep. Development of the vessel strengthening schemes for ground contact. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2020;12(5):915–925. (In Russ.). DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-915-925.
3. GOST 25100-2011. Soils. Classification. Moscow, Standartinform, 2018.
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095052> – 21.06.2022. (In Russ.).
4. Recommendations for determining the stickiness of soils in stationary laboratory and field conditions. PNIIS GCosstroy USSR. Moscow, Stroyizdat, 1983. (In Russ.).

Проектирование и конструкция судов

Научная статья

УДК 629.12

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/32-41>

Ю.А. Кочнев

КОЧНЕВ ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ – к.т.н., доцент, tmnknkoch@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6864-4473>

Кафедра проектирования и технологии постройки судов

Волжский государственный университет водного транспорта

Нижний Новгород, Россия

Потенциал безопасности грузового судна

Аннотация. Большинство нормативных документов в области судостроения направлены на обеспечение и повышение безопасности судов, оценка которой выполняется по показателям отдельных мореходных качеств: плавучесть, остойчивость, прочность, непотопляемость. Фактически утверждается, если эти показатели обеспечены, то, следовательно, обеспечивается и безопасность судна. В соответствии с общепринятой терминологией безопасность судна – это отсутствие связанных с проектированием, строительством и эксплуатацией судна недопустимых рисков, которые определяются на основе статистики по всем видам деятельности, то есть учитывают имеющийся опыт, а не возможные случайные факторы системы «судно–окружающая среда». В статье предлагается комплексный критерий, показывающий превышение фактических характеристик судна над их опасными значениями. Он позволяет сравнивать разнородные суда по безопасности в целом, а не только по отдельным мореходным качествам. Приведены методика расчета критерия, схема формирования и, в качестве примера, численные значения для трех типов судов смешанного (река–море) плавания.

Ключевые слова: безопасность, мореходные качества, остойчивость, плавучесть, прочность

Для цитирования: Кочнев Ю.А. Потенциал безопасности грузового судна // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 32–41.

Введение

Наиболее общие требования к безопасности грузового судна смешанного (река–море) плавания изложены в Техническом регламенте о безопасности объектов внутреннего водного транспорта (ТР), который предъявляет требования к видам безопасности: биологической, взрывобезопасности, гидрометеорологической, механической, пожарной, термической, химической, электрической, электромагнитной, экологической, единству измерений и другим видам безопасности, к которой применимы требования [10].

Однако сам термин «безопасность» раскрывается в Федеральном законе о техническом регулировании (ФЗ) [11], где определяющим понятием безопасности судна является отсутствие недопустимого риска. Однако строгого определения риска также не дано ни в ТР, ни в ФЗ. Имеется противоположное понятие – допустимого риска: установленные проектантом значения рисков, отвечающие фактически достигаемому уровню, который должен быть обеспечен при проектировании, изготовлении, эксплуатации и утилизации с учетом технических и экономических возможностей проектанта, изготовителя и эксплуатанта [10].

Несмотря на неоднократное упоминание термина «безопасность судна», точного его определения автору установить не удалось. Однако исходя из анализа близких терминов можно выделить два их существенных недостатка:

1) риски рассчитываются на основе совершенных процессов, то есть не учитываются возможные случайные факторы системы судно–окружающая среда (уникальные ошибки экипажа, неточности принятых методик прогнозирования и т.п.), которые могут значительно отличаться от расчетных значений;

2) допускается наличие риска, в том числе и гибель судна, обусловленного техническими и экономическими обстоятельствами, устанавливаемыми не нормативно, а проектантом.

Снизить вероятность наступления неблагоприятных последствий и тем самым понизить риски можно путем искусственного завышения проектантом технических требований, учета возможного случайного значения внешних и внутренних факторов системы «судно–окружающая среда» в явном и неявном виде.

Уровень превышения характеристик судна в целом или его отдельных элементов над такими искусственно завышенными требованиями можно рассматривать как некоторый запас по риску и, соответственно, косвенный показатель безопасности. Но так как непосредственно риск, являющийся неотъемлемой основой понятия «безопасность», в таком случае не рассчитывается, будем использовать термин «потенциал безопасности» (ПБ). Близкое понятие – «потенциал живучести» – рассматривается, например в [5], с точки зрения автоматизации организационных работ по борьбе за живучесть кораблей ВМФ. В отечественных и зарубежных работах [1, 18, 12] безопасность оценивается как выполнение тех или иных мореходных качеств судна: остойчивости, непотопляемости, прочности.

В настоящей работе математически потенциал безопасности запишем в виде:

$$ПБ = \frac{K_p}{K_{np}}, \quad (1)$$

где K_p – расчетное значение характеристик судна;

K_{np} – опасное (предельное) значение характеристик судна.

Методики для получения расчетных характеристик судна в большинстве своем имеют хорошо разработанную и апробированную базу и не требуют дополнительных обоснований. Предельные значения характеристик судна, при которых может развиваться авария или дальнейшая эксплуатация судна становится невозможной, как правило, не определены.

Материалы и методы

Обеспечение безопасности можно классифицировать по нескольким уровням (рис. 1). Во-первых, безопасность зависит от заложенных в процессе проектирования характеристик судна, во-вторых – от решений, принимаемых экипажем во время эксплуатации. Потенциал безопасности определяется на проектном уровне и позволяет нивелировать человеческие ошибки и случайные внешние факторы в течение жизненного цикла судна.

Из теории и устройства судна известно, что основными мореходными качествами являются плавучесть, остойчивость, непотопляемость, прочность, ходкость, управляемость, плавность качки [4]. Непосредственно гибель судна может произойти при *потере им плавучести и остойчивости*, поэтому отнесем их характеристики к показателям безопасности первого уровня. Непотопляемость, являющуюся комплексным мореходным качеством, включающим совместно два предыдущих качества, исключим из потенциала безопасности, аналогично поступим и с качкой, поскольку она зависит от остойчивости, а потеря последней, как правило, связана именно с показателями качки судна.

Потеря мореходных качеств (прочность, ходкость и управляемость) самостоятельно к гибели судна не приводит, однако в ряде случаев существенно ухудшает показатели безопасности первого уровня. Например, вариант потери общей прочности в виде перелома корпуса судна приведет к возникновению его негерметичности, следовательно, к поступлению воды внутрь и постепенному исчерпанию мореходного качества плавучести. Поэтому перечисленные мореходные качества отнесем ко второму уровню показателей безопасности судна.

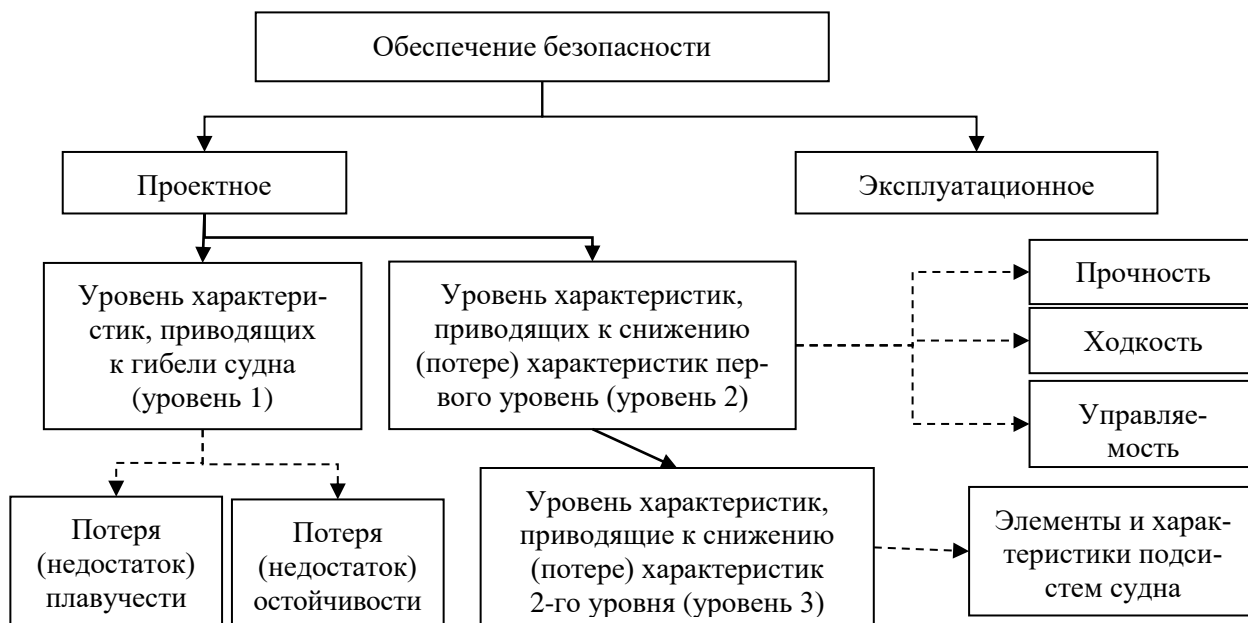


Рис. 1. Уровни безопасности судна

Снижение характеристик основных подсистем судна будет оказывать влияние на первый и второй уровни безопасности, но привести к полному исчерпанию плавучести и остойчивости они не в состоянии. Такие характеристики отнесем к третьему уровню показателей безопасности. Например, низкая держащая сила якоря окажет свое влияние на управляемость (судно сорвет с якоря, и оно начнет перемещаться без управления), а она, в свою очередь, может привести к потере остойчивости или потере прочности и в результате к гибели судна.

Учитывая предложенный иерархический вид влияния характеристик судна на безопасность, потенциал безопасности можно записать в виде

$$ПБ = \left(\Gamma_1^I \times \beta_1^I \times \Gamma_1^{II} + \Gamma_2^I \times \beta_2^I \right) \times \beta_1^{III}, \quad (2)$$

где Γ_1^I – частный потенциал безопасности показателей первого уровня – потенциал плавучести;

Γ_2^I – частный потенциал безопасности показателей первого уровня – потенциал остойчивости;

Γ_1^{II} – частный потенциал безопасности показателей второго уровня – потенциал прочности;

β_1^I, β_2^I – весовые коэффициенты влияния показателей безопасности первого уровня;

β_1^{III} – коэффициент влияния показателей безопасности третьего уровня на потенциал безопасности.

Потенциал безопасности показателей первого и второго уровней (плавучесть, остойчивость, прочность) в связи с тем, что есть некоторое минимально требуемое Правилами Российского классификационного общества [9] значение, целесообразно представлять как превышение фактического значения характеристики над ее нормой.

Нормативное значение для характеристик подсистем судна, то есть для показателей безопасности третьего уровня, как правило, не является абсолютно жестким требованием и в большинстве случаев может лежать в некотором допустимом диапазоне значений. Поэтому потенциал безопасности показателей безопасности третьего уровня, на наш взгляд, должен представляться как недостаток численного значения характеристики или элемента до его оптимального, с точки зрения безопасности, значения.

Из теории корабля известно, что запас плавучести – это объем водонепроницаемого

корпуса выше ватерлинии, который в практике проектирования судна определяется в виде высоты надводного борта. Опасным значением надводного борта можно считать его минимальное значение, которое должно быть обеспечено, чтобы судно оставалось на плаву при затоплении одного или нескольких регламентируемых Правилами отсеков. Таким образом, частный потенциал безопасности – плавучесть – может быть записан в виде:

$$\Gamma_1^I = \frac{H - T}{H_{HB}^{\min}}, \text{ при } H - T \geq H_{HB}^{PKO}, \quad (3)$$

$$\Gamma_1^I = 0, \text{ при } H - T < H_{HB}^{PKO}, \quad (4)$$

где H, T – соответственно высота борта и осадка судна;

H_{HB}^{PKO} – значение минимальной высоты надводного борта, требуемое Правилами РКО;

H_{HB}^{\min} – минимально необходимое значение надводного борта из условия запаса плавучести, определяемое по формуле

$$H_{HB}^{\min} = \max \{T_x^i\} - T_{KBЛ}, \text{ при } i \in I, \quad (5)$$

где $T_{KBЛ}$ – осадка судна по КВЛ;

T_x^i – осадка в опасном сечении, при затоплении i -го отсека;

I – массив отсеков, которые должны быть затоплены при проверке непотопляемости судна.

Осадка судна в опасном сечении учитывает изменение геометрии палубной линии за счет носового и кормового сужения, наличия седловатости или бака и юта (рис. 2) определяется выражением

$$T_x^i = T_m + x \times tg\psi + B(x)tg\theta, \quad (6)$$

где T_m – осадка судна на мидели при затоплении i -го отсека;

x – абсцисса опасного сечения;

$B(x)$ – полуширина судна в опасном сечении;

ψ, θ – угол дифферента и крена при затоплении i -го отсека.

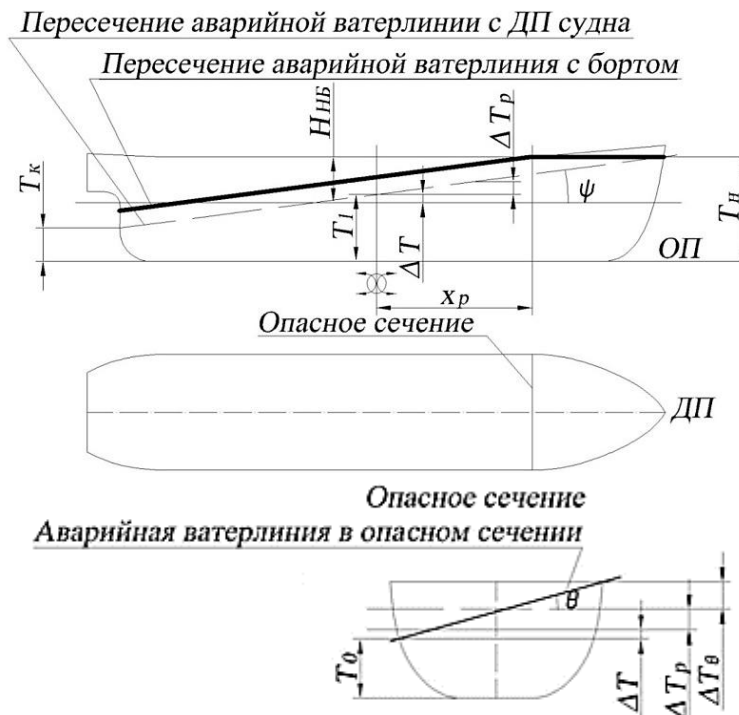


Рис. 2. Опасное сечение судна

Потенциал остойчивости судна может быть выражен как соотношение фактического коэффициента запаса остойчивости – соотношения кренящих и допустимых моментов, определенных так, как этого требуют Правила Регистра (K_ϕ), к требуемой величине запаса остойчивости Φ :

$$\Gamma_2^I = \frac{K_\phi}{\Phi} = K_p, \text{ при } K_\phi \geq 1, \quad (7)$$

$$\Gamma_2^I = 0, \text{ при } K_\phi < 1, \quad (8)$$

где K_p – опасное значение коэффициента запаса остойчивости, определяемое при учете проверки остойчивости нормируемых и ненормируемых (эксплуатационных) факторов;
 Φ – коэффициент запаса остойчивости [7].

В общем виде опасное значение коэффициента запаса остойчивости находится по формуле [9, 10]:

$$K_p = 1 + dw(D, Z_G, \Delta l), \quad (9)$$

где w – функциональная зависимость между допустимым и кренящим моментами;

D – фактическое водоизмещение судна;

Z_G – координаты центра тяжести судна;

Δl – поправки к плечу статической остойчивости, на влияние свободной поверхности жидких грузов в малых цистернах, на циркуляцию и т.п.

Проверка прочности судна выполняется как по допустимым напряжениям, так и предельному моменту, при расчете которого уже используется коэффициент запаса прочности по предельному моменту k , равный для судов всех типов и классов 1,35 [9]. Однако в исследованиях, приведенных в [2, 3], показано, что опасным значением коэффициента k следует считать его величину, равную 1,19.

Фактический коэффициент запаса прочности может быть получен из соотношения предельного момента M_{np} , определенного так, как этого требуют Правила к расчетному изгибающему моменту M_p :

$$k_\phi = \frac{M_{np}}{M_p}. \quad (10)$$

Соответственно, частный потенциал безопасности показателей второго уровня – прочность – находится по формуле

$$\Gamma_1^{II} = \frac{k_\phi}{1,35}, \text{ при } k_\phi \geq 1,19, \quad (11)$$

$$\Gamma_1^{II} = 0, \text{ при } k_\phi < 1,19. \quad (12)$$

К показателям безопасности третьего уровня могут быть отнесены характеристики всех мореходных качеств судна. Поскольку их сниженное значение к гибели судна не приводит, частный потенциал безопасности целесообразно выразить как недостаток того или иного качества от его оптимального значения:

$$\Gamma^{III} = \frac{A_\phi}{A_{opt}}, \quad (13)$$

где A_ϕ – фактическое значение элемента или характеристики судна;

A_{opt} – оптимальное значение элемента или характеристики судна.

В качестве показателей безопасности третьего уровня рассмотрены время, затрачиваемое на эвакуацию из помещений надстройки членами экипажа, несущими вахту, и держащая сила судового якоря, то есть

$$\Gamma_1^{III} = \frac{F_{я}}{F_{opt}}, \tag{14}$$

$$\Gamma_2^{III} = \frac{T_{\phi}}{T_{opt}}, \tag{15}$$

где $F_{я}, F_{opt}$ – соответственно держащая сила принятого на судне якоря и оптимального [6];
 T_{ϕ}, T_{opt} – соответственно время эвакуации из надстройки с проектным и оптимальным расположением помещений.

Окончательно можно предложить схему формирования потенциала безопасности грузового судна смешанного (река–море) плавания (рис. 3).

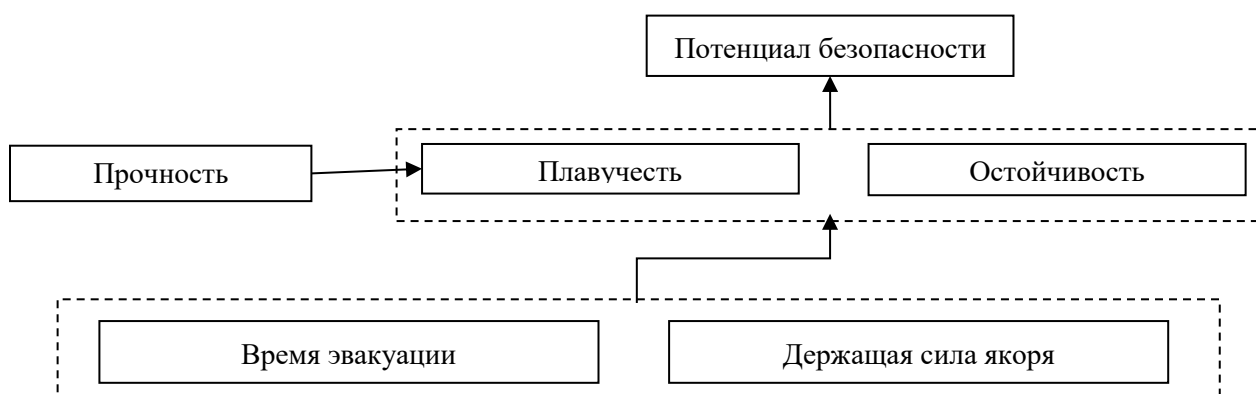


Рис. 3. Схема формирования потенциала безопасности судна

Коэффициенты влияния показателей первого уровня на потенциал безопасности учитывают долю в нем плаву́чести и осто́йчивости, и в связи с тем, что потеря осто́йчивости происходит более скоротечно, приняты $\beta_1^I = 0,3$, $\beta_2^I = 0,7$. Коэффициент влияния показателей третьего уровня снижает ПБ в связи с неоптимальными значениями, распределен в диапазоне от 0 до 1 и определяется по формуле

$$\beta_1^{III} = \sum_{j=1}^n \Gamma_j^{III} \alpha_j, \text{ при } j \in N_1, \tag{16}$$

где Γ_j^{III} – потенциал безопасности показателей третьего уровня для j-й подсистемы судна;
 N_1 – массив показателей третьего уровня, принятых в расчете потенциала безопасности;
 α_j – весовой коэффициент влияния показателей безопасности третьего уровня, определяемых экспертно из условия

$$\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1. \tag{17}$$

Результаты

Анализ потенциала безопасности выполнен для трех грузовых судов смешанного (река–море) плавания: нефтеналивного танкера, сухогруза с носовой надстройкой и комбинированного судна типа танкер/площадка (см. таблицу).

Наибольший потенциал безопасности имеет нефтеналивной танкер, что можно объяснить следующими факторами: при ходе судна «в грузу» влияние перемещения жидкого груза невелико (в связи с наполненностью танков на 96%); танкер имеет большую высоту надводного борта и, следовательно, большую составляющую потенциала безопасности – плаву́честь.

Расчетные значения безопасности судов смешанного (река-море) плавания

Характеристика	Тип судна		
	Танкер	Сухогруз	Комбинированное
Длина, м	139	140,66	140,66
Ширина, м	16,6	16,7	16,7
Осадка, м	3,74	3,6	3,6
Высота борта, м	6,1	5,0	5,0
Опасное значение коэффициента запаса остойчивости	6,4	5,2	2,6
Потенциал безопасности – остойчивость	6,4	5,2	2,6
Фактическая высота борта	2,36	1,4	1,4
Опасное значение высоты надводного борта	1,19	0,67	0,75
Потенциал безопасности – плавучесть	1,98	2,08	1,87
Коэффициент запаса прочности	1,77	1,45	1,84
Потенциал безопасности – прочность	1,31	1,07	1,36
Оптимальное время эвакуации из надстройки	5,1	5,1	5,1
Время эвакуации из надстройки	5,1	91,2	5,1
Потенциал безопасности – надстройка	1	0,06	1
Тип судового якоря	Холла	Холла	Холла
Потенциал безопасности – судовой якорь	0,35	0,35	0,35
Полный потенциал безопасности	3,87	0,75	1,94

Существенное снижение потенциала безопасности на всех рассмотренных судах связано с применением якоря Холла, а на сухогрузном судне перенос рулевой рубки в носовую часть понижает еще и потенциал надстройки судна в связи со значительным увеличением времени эвакуации с судна (посадка в спасательную шлюпку).

Приведенный анализ показывает приспособленность предложенной методики оценки потенциала безопасности для различных судов, в том числе для судов, имеющих особенности архитектурно-конструктивного типа (носовая надстройка, наличие грузовой открытой площадки для сухого обратного груза на наливном судне).

Обсуждение

Разработанный потенциал безопасности позволяет оценивать комплексный уровень технической безопасности однотипных и разнотипных судов на этапе их проектирования, что может найти применение как в области сравнения судов по рассматриваемому показателю, так и при оптимизации элементов и характеристик как один из частных критериев эффективности.

Уход от прямого расчета рисков, которые имеют место в методиках для нормативных величин, значительно упрощает оценку безопасности судна, что позволяет учитывать маловероятные факторы.

Если остойчивость, плавучесть и прочность практически однозначно определяют выделенные показатели безопасности первого и второго уровней, то коэффициент влияния третьего уровня может быть дополнен другими характеристиками подсистем судна. Для однозначной идентификации ПБ необходимо, по-видимому, разработать систему кодирования или классификации, показывающую, какие частные значения потенциала учтены в его конечной величине.

Результаты численного эксперимента показывают влияние главных размерений и принятых конструктивных решений на полный и частные потенциалы безопасности, которые в итоге также могут быть использованы конструктором для поиска слабых мест проекта и, как следствие, при необходимости их усиления для снижения вероятности аварии.

Выводы

Потенциал безопасности грузового судна как в предложенном, так и уточненном виде с учетом нерассмотренных, но принципиально применимых характеристик, например для мореходного качества «ходкость», можно рассматривать как один из потенциальных критериев общей оценки технической безопасности судна. Его рассмотрение является задачей Российского Классификационного общества, но отсутствует в структуре Правил, несмотря на наличие упоминаний об этом в Уставе.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Борисов Р.В., Лузянин А.А. Безопасность судна, качающегося под действием нерегулярных ветра и волн // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2-2(56). С. 22–28. DOI: 10.37220/МИТ.2022.56.2.037
2. Гирин С.Н., Фролов А.М. К вопросу нормирования общей прочности судов смешанного плавания с классом Российского Речного Регистра // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2004. № 10. С. 93–100.
3. Гирин С.Н., Фролов А.М. О назначении коэффициентов запаса при проверке общей прочности судов смешанного плавания по методу предельных моментов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2004. № 10. С. 100–109.
4. Жинкин В.Б. Теория и устройство корабля. Москва: Юрайт, 2019. 379 с.
5. Зварич И.М., Лобанов С.Л., Бледнов Д.А., Цапков А.П. Потенциал живучести кораблей ВМФ// Морской сборник. 2021. № 3(2088). С. 34–39.
6. Кочнев Ю.А., Костерина С.Д. Испытания модели судового якоря // Транспорт. Горизонты развития: материалы II междунар. науч.-практ. форума, Нижний Новгород, 7–9 июня 2022 г. Нижний Новгород: ВГУВТ, 2022. URL: http://вф-река-море.рф/2022/PDF/5_18.pdf (дата обращения: 02.11.2022).
7. Кочнев Ю.А., Роннов Е.П. Анализ уровня запаса остойчивости судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2022. № 3(52). С. 37–46. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-3/37-46
8. Москаленко М.А., Друзь И.Б., Москаленко В.М. Методологические подходы к проектированию морских транспортных судов с использованием математических моделей комплексного показателя и оценок риска // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2020. Т. 12, № 5. С. 906–914. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-906-914
9. Российское классификационное общество. Правила классификации и постройки судов (ПКПС). Москва, 2022. URL: <https://rfclass.ru/assets/Uploads/PKPS.pdf?t=321> (дата обращения: 06.11.2022).
10. Технический регламент о безопасности объектов внутреннего водного транспорта: утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 12 августа 2010 г. № 623. Москва: Стандартинформ, 2010. 90 с.
11. Федеральный Закон № 184-ФЗ. О техническом регулировании. Введ. 2002-27-12. Москва: Омега-Л, 2009. 56 с.
12. Hasanudin, Jeng-Hornng Chen, Modification of the Intact Stability Criteria to Assess the Ship Survivability from Capsizing. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2015;14:64–75. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.07.086
13. Kochnev Y.A, Ronnov E.P., Gulyev I.A. Indicators of the critical state of the ship's stability. Indicators of the critical state of the ship's stability. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2021;2131:052057. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052057

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/32-41>

Kochnev Yu.

YURI A. KOCHNEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, tmnknkoch@mail.ru
Federal State-Financed Educational Institution
Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

Cargo ship safety potential

Abstract. Most of the regulatory documents in the field of shipbuilding are aimed at ensuring and improving the safety of ships, the assessment of which is carried out according to the indicators of individual seaworthiness: buoyancy, stability, strength, unsinkability. In fact, it is claimed that if they are secured, then, as a consequence, the safety of the vessel is also ensured. The latter, in accordance with generally accepted terminology, is the absence of unacceptable risks associated with the design, construction and operation of the vessel, which are determined on the basis of statistics on all types of activities, that is, they take into account existing experience, and not possible random factors of the ship – environment system. The article offers a comprehensive criterion showing the excess of the actual characteristics of the vessel over their dangerous values, which allows you to compare heterogeneous vessels for safety in general, and not only for individual seaworthiness. The method of its calculation, the scheme of formation and numerical values are given, as an example, for three types of vessels of mixed (river-sea) navigation.

Keywords: safety, seaworthiness, stability, buoyancy, strength

For citation: Kochnev Yu. Cargo ship safety potential. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):32–41. (In Russ.).

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Borisov R.V., Luzyanin A.A. Safety of a vessel rocking under the action of irregular winds and waves. *Marine intelligent technologies*. 2022;(2–2):22–28. (In Russ.). DOI: 10.37220/MIT.2022.56.2.037
2. Girin S.N., Frolov A.M. To a question of overall strength notes for ships of "river-sea" type with Russian River Register's Class. *Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*. 2004;(10):93–100. (In Russ.).
3. Girin S.N., Frolov A.M. On the appointment of reserve coefficients when checking the overall strength of mixed navigation vessels by the method of limiting moments. *Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*. 2004;(10):100–109. (In Russ.).
4. Zhinkin V.B. Theory and device of the ship. Moscow, Yurayt, 2019. 379 p. (In Russ.).
5. Zvarich, I.M., Lobanov S.L., Blednov D.A., Tsapkov A.P. The survivability potential of Navy ships. *Marine Collection*. 2021;(3):34–39. (In Russ.).
6. Kochnev Yu.A. Kosterina S.D. Ship anchor model tests. Horizons of development. *Proc. of the Int. Sci. and Prac. Forum*. 2022. URL: http://вф-река-море.rf/2022/5_18.pdf – 02.11.2022. (In Russ.).
7. Kochnev Yu.A., Ronnov E.P. Analysis of the level of stability reserve of inland and mixed (river-sea) navigation vessels. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(3):37–46. (In Russ.). DOI: 10.24866/2227-6858/2022-3/37-46
8. Moskalenko M.A., Druz I.B., Moskalenko V.M. Methodological approaches to the design of marine transport vessels using mathematical models of a complex indicator and risk assessments. *Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of the Sea and River Fleet*. 2020;12(5):906–914. (In Russ.). DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-906-914
9. Russian Classification Society. Rules for the Classification and Construction of Ships. Moscow, 2022. URL: <https://rfclass.ru/assets/Uploads/PKPS.pdf?t=321> – 06.11.2022. (In Russ.).

10. Technical Regulations on the safety of inland waterway transport facilities: approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 623 of August 12, 2010, Moscow, Russian Federation. Moscow, Standartinform, 2010. 90 p. (In Russ.).
11. Federal Law No. 184-FZ. About technical regulation. Introduction 2002-27-12. Moscow, Omega-L, 2009. 56 p. (In Russ.).
12. Hasanudin, Jeng-Horng Chen, Modification of the Intact Stability Criteria to Assess the Ship Survivability from Capsizing. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2015;14:64–75. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.07.086
13. Kochnev Y.A, Ronnov E.P., Gulyev I.A. Indicators of the critical state of the ship's stability. Indicators of the critical state of the ship's stability. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2021;2131:052057. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052057

Проектирование и конструкция судов

Научная статья

УДК 629.12

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/42-58>

М.В. Китаев, Д.В. Тюфтяев, Д.А. Тортыжева

КИТАЕВ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., доцент, kitaev.mv@dvfu.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-5345-6333>ТЮФТЯЕВ ДМИТРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – студент, tyuftyaev.dv@students.dvfu.ruТОРТЫЖЕВА ДАРЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА – студент, tortyzheva.da@students.dvfu.ru

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Математическая модель проектирования грузового судна

Аннотация. В статье рассмотрена математическая модель, предназначенная для автоматизации расчетов, выполняемых на начальных стадиях проектирования морских грузовых судов (танкеры, балкеры, контейнеровозы и универсальные сухогрузы). Для определения главных размерений и коэффициентов полнот в модели используются формулы, результаты статистического анализа данных современных судов-прототипов. В расчетах ходкости с использованием метода Холтропа учитываются особенности обводов и формы корпуса, характеристики носового бульба. Для определения гидродинамических и геометрических характеристик гребного винта применяются аппроксимирующие полиномы, полученные для коэффициентов упора и момента гребных винтов серии В. Марка. Характеристики главного двигателя выбираются по специальному алгоритму из созданной авторами базы данных судовых дизельных двигателей, выпускаемых как в нашей стране, так и за рубежом. Рассчитываются основные показатели остойчивости и прочности проектируемых судов. В качестве исходных данных выступают скорость, грузоподъемность и величины, характеризующие условия проектирования, постройки и эксплуатации судов. К результатам относятся главные размерения и коэффициенты полнот, водоизмещение и составляющие нагрузки, строительная стоимость и экономические показатели функциональной эффективности. Функциональная эффективность и экономические показатели оцениваются с учетом проектного срока службы судна и инфляции. Математическая модель реализована в виде программы для ЭВМ и может использоваться на начальных этапах проектирования для автоматизации расчетов и экспресс-оценки характеристик, элементов и экономической эффективности судов-претендентов для заданных линий эксплуатации.

Ключевые слова: проектирование судов, математическая модель, автоматизация вычислений, функциональная эффективность, экономические показатели

Для цитирования: Китаев М.В., Тюфтяев Д.В., Тортыжева Д.А. Математическая модель проектирования грузового судна // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 42–58.

Введение

Морской транспорт широко используется в международной торговле для доставки грузов от производителей к потребителям как наиболее надежный и экономичный в сравнении с автомобильным, железнодорожным и воздушным [18]. Потребность в морских перевозках и новых судах во многом зависит от уровня развития и ориентированности экономики государства. Несмотря на подъемы и спады в международной торговле, долгосрочные перспективы в области судостроения остаются хорошими. С увеличением численности населения растет и потребность в готовых товарах, энергоресурсах и сырье, которые перевозятся в основном морем.

Грузовые суда являются наиболее востребованными и многочисленными на рынке

© Китаев М.В., Тюфтяев Д.В., Тортыжева Д.А., 2022

Статья поступила: 30.05.2022; рецензирование: 08.08.2022; 07.12.2022.

морских перевозок (рис. 1), а спрос на проектирование и постройку таких судов увеличивается (рис. 2). В количественном отношении и по тоннажу наиболее многочисленными являются универсальные сухогрузные суда (УСС), навалочники, танкеры и контейнеровозы [17, 20]. Из анализа возрастного состава флота следует, что в обозримом будущем станет актуальной проблема обновления и пополнения флота УСС и нефтеналивных судов новыми судами (рис. 3) [9]. Работы в данном направлении ведутся уже сейчас. Так, по данным 2020 г., мировой флот танкеров, предназначенных для перевозки сжиженного природного газа (LNG), насчитывал 642 судна. При этом в период с 2010 по 2021 г. количество новых судов постоянно увеличивалось [17].

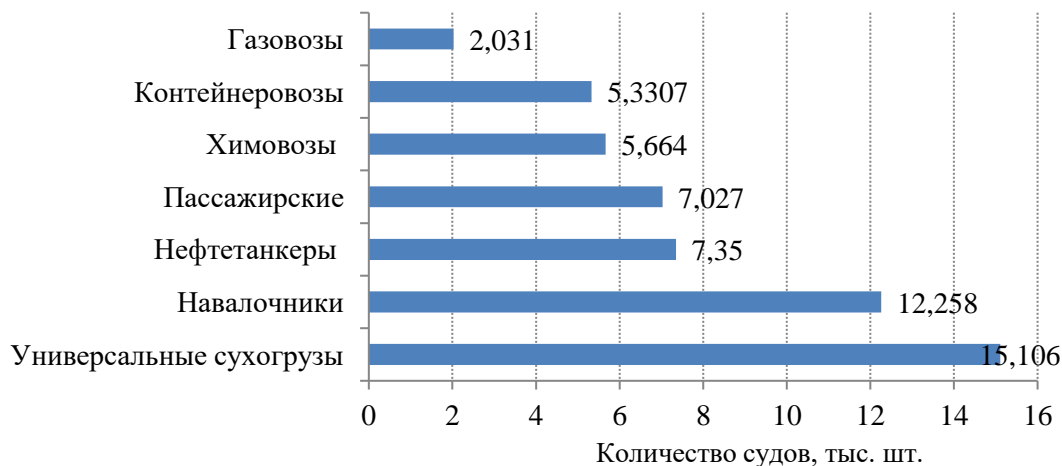


Рис. 1. Количество судов различных типов (по состоянию на 1 января 2021 г.) [17]

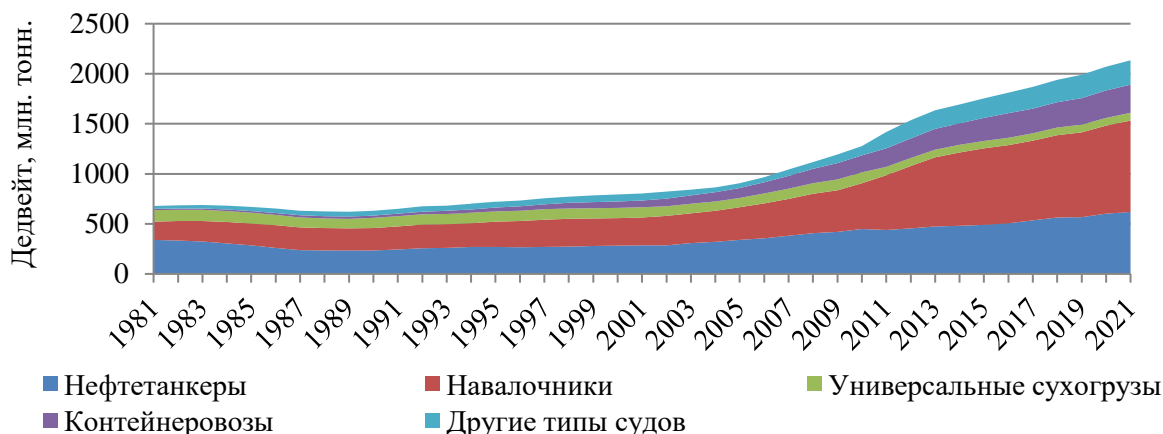


Рис. 2. Изменение состава мирового флота по типам судов [20]

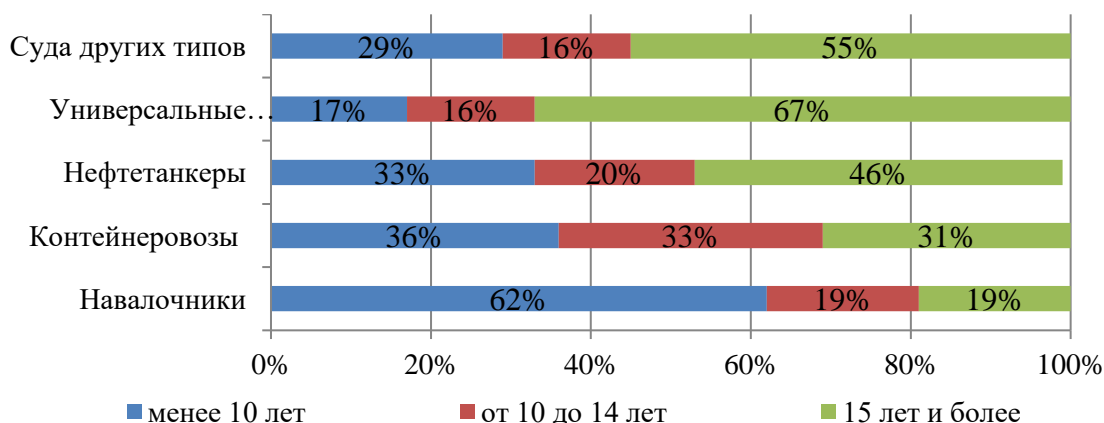


Рис. 3. Возрастной состав мирового флота (по состоянию на 2019–2020 гг.) [17]

Решение задач, связанных с обновлением и пополнением отечественного флота, невозможно без автоматизации основных расчетов по проектированию судов и теории корабля. Системы автоматизированного проектирования (САПР) в большей степени предназначены для поздних этапов проектирования (эскизное и техническое проектирование, разработка рабочей и конструкторской документации). В то же время этапы, связанные с расчетами технико-экономического обоснования, разработкой основных технико-эксплуатационных требований и последующим формированием задания на проектирование, как показывает практика, слабо автоматизированы. Проблема в том, что методики, используемые при проектировании судов, сложно алгоритмируются, так как основаны на использовании большого количества графиков, таблиц, номограмм, алгоритмов и численных методов. Каждый тип судов имеет свои особенности, что не позволяет применять одни и те же методики и зависимости для разных типов судов.

Для решения указанной задачи в настоящем исследовании разработана математическая модель, реализованная в виде программы для ЭВМ и предназначенная для автоматизации расчетов, выполняемых на начальных стадиях проектирования морских грузовых судов (танкеры, балкеры, контейнеровозы и универсальные сухогрузы). При разработке модели использовались как классические методы теории корабля и проектирования судов, так и специальные методы и алгоритмы, разработанные авторами для учета конструктивных особенностей судов рассматриваемых типов.

Анализ главных размерений и характеристик судов

Для расчета главных размерений и характеристик формы корпуса судов рассматриваемых типов в модели использовались результаты анализа значений проектных характеристик судов-прототипов, построенных в период с 2000 по 2021 г. в нашей стране и за рубежом. В качестве источников исходной информации использовались официальные базы данных классификационных обществ – членов МАКО (Международная ассоциация классификационных обществ): Российский морской регистр судоходства (РС) [6], Американское бюро судоходства (ABS) [10] и Детнорский Веритас (DNV) [22]. Количество проанализированных судов (по типам): навалочники – 100, УСС – 46, контейнеровозы – 42 и нефтетанкеры – 52.

В качестве примера для навалочников показаны зависимости, характеризующие результаты анализа запасов различных видов топлива и смазочного масла в зависимости от мощности главного двигателя (N_{20}) (рис. 4) Так, запасы дизельного топлива по отношению к мазуту анализируемых судов составляют k_1 , а запасы смазочного масла по отношению к запасам мазута – k_2 . Следует отметить, что дизельное топливо с низким содержанием серы (MDO, Marine Diesel Oil) используется в основном для прохождения зон контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферу [11], и его запасы на судне малы в сравнении с запасами более дешевого мазута (HFO, Heavy Fuel Oil).

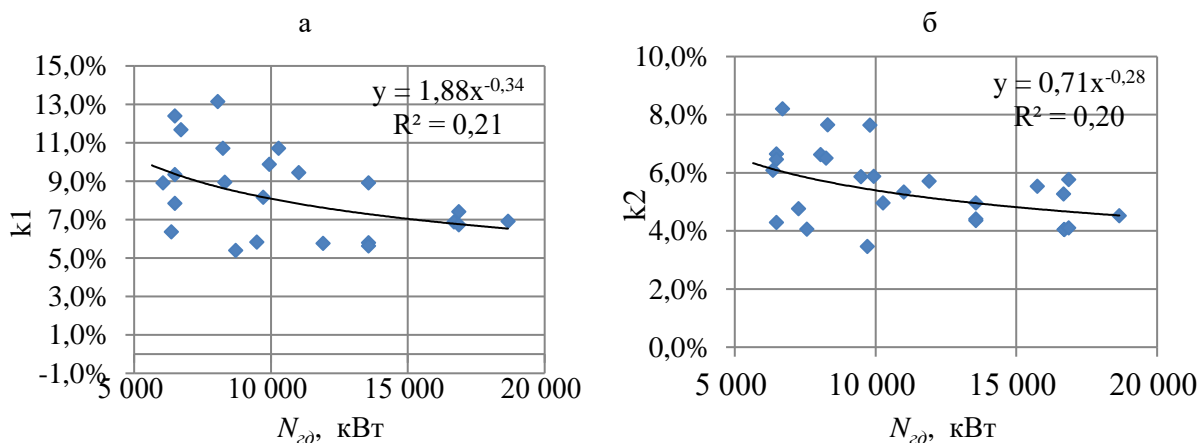


Рис. 4. Запасы дизельного топлива (а) и смазочного масла (б)

На рис. 5 показаны зависимости главных размерений – наибольшей длины ($L_{нб}$) и ширины (B) в функции от дедвейта (DW) и контейнеровместимости (n).

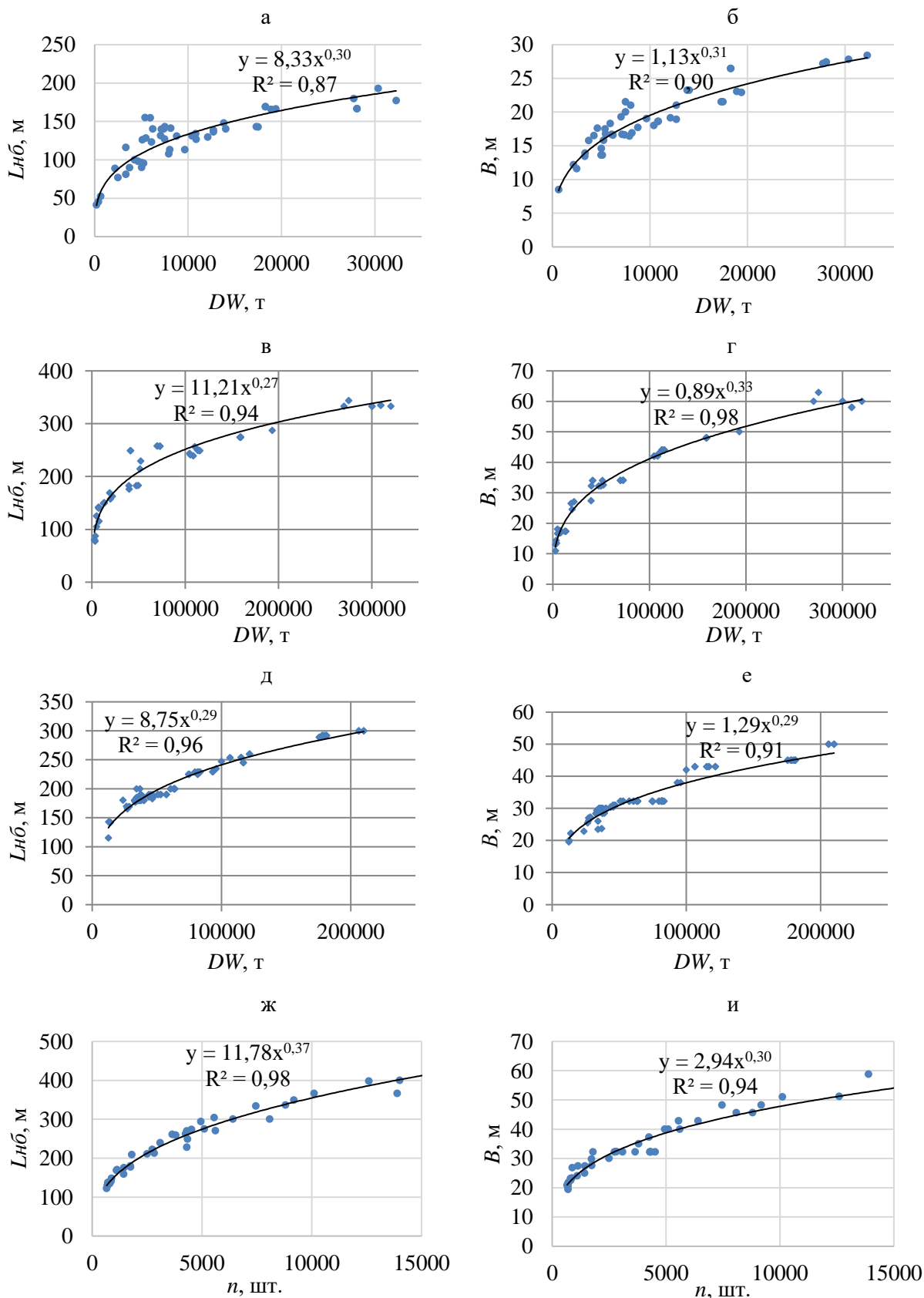


Рис. 5. Результаты обработки данных судов-прототипов:
а, б – УСС; в, г – нефтетанкеры; д, е – навалочники; ж, и – контейнеровозы

Из приведенных графиков видно, что выбор судов для анализа осуществлялся таким образом, чтобы их главные размерения и проектные характеристики были (по возможности) равномерно распределены между максимальными и минимальными значениями. В целом отметим высокую достоверность полученных зависимостей. Так, для основных формул значения коэффициента детерминации (R^2), показывающего степень соответствия линии тренда исходным данным, превышает 0,80.

В табл. 1 показаны результаты анализа главных размерений и характеристик судов-прототипов. Формулы для определения запасов балласта (P_{δ}) получены в функции от дедвейта, а для соотношений главных размерений – от расчетной длины (L). Установлены диапазоны изменения значений адмиралтейского коэффициента (C_a) и коэффициента утилизации водоизмещения по дедвейту (η_{DW}) для рассматриваемого диапазона характеристик (см. рис. 5).

Таблица 1

Результаты анализа главных размерений и характеристик судов

Величина	Тип судна			
	УСС	Нефтетанкеры	Навалочники	Контейнеровозы
D , т	$1,31 \cdot DW + 788$	$1,13 \cdot DW + 5294$	$1,10 \cdot DW + 4636$	$0,78 \cdot DW - 1385$
$L_{нб}$, м	$8,33 \cdot DW^{0,30}$	$11,21 \cdot DW^{0,27}$	$8,75 \cdot DW^{0,29}$	$11,78 \cdot n^{0,37}$
L , м	$0,96 \cdot L_{нб} - 3,03$	$0,96 \cdot L_{нб} - 1,03$	$1,00 \cdot L_{нб} - 7,49$	$0,97 \cdot L_{нб} - 5,95$
B , м	$1,12 \cdot DW^{0,31}$	$0,88 \cdot DW^{0,33}$	$1,29 \cdot DW^{0,29}$	$2,93 \cdot n^{0,30}$
H , м	$0,40 \cdot DW^{0,34}$	$0,36 \cdot DW^{0,35}$	$0,57 \cdot DW^{0,31}$	$0,93 \cdot n^{0,36}$
T , м	$0,25 \cdot DW^{0,36}$	$0,26 \cdot DW^{0,34}$	$0,52 \cdot DW^{0,28}$	$1,43 \cdot n^{0,26}$
L/B	$0,0090 \cdot L + 5,42$	$0,0006 \cdot L + 5,81$	$0,0005 \cdot L + 6,27$	$0,0065 \cdot L + 5,21$
B/T	$0,0026 \cdot L + 2,55$	$0,0001 \cdot L + 2,79$	$0,0004 \cdot L + 2,59$	$0,0017 \cdot L + 2,36$
L/H	$0,0158 \cdot L + 11,78$	$0,0004 \cdot L + 11,27$	$0,0002 \cdot L + 11,43$	$0,0033 \cdot L + 11,38$
$N_{сд}$, кВт	$0,60 \cdot V_S^{3,39}$	$0,7834 \cdot V_S^{3,52}$	$0,3372 \cdot V_S^{3,82}$	$0,1088 \cdot V_S^{3,89}$
P_{δ} , т	$0,28 \cdot DW^{1,0354}$	$0,57 \cdot DW^{0,9696}$	$0,12 \cdot DW^{1,1192}$	$1,89 \cdot DW^{0,82}$
η_{DW}	$0,58 \div 0,82$	$0,64 \div 0,89$	$0,74 \div 0,89$	$0,67 \div 0,77$
C_a	$184 \div 528$	$217 \div 738$	$276 \div 967$	$453 \div 779$

Математическая модель проектирования грузового судна

Математическая модель имеет алгоритмическую структуру и предназначена для расчета главных размерений и коэффициентов полнот, составляющих водоизмещения порожнем и дедвейта, среднесерийной строительной стоимости, показателей функциональной эффективности и экономических критериев. Модель реализована в виде программы для ЭВМ, позволяет производить расчеты, выполняемые на начальных стадиях проектирования [4], по теории корабля и проектированию для четырех типов судов: балкер, танкер, контейнеровоз и УСС. Выбор типа судна определяет совокупность зависимостей, используемых для определения главных размерений, составляющих нагрузки, дедвейта, строительной стоимости и других величин. Показатели функциональной эффективности в модели рассчитываются за год (расчетный период).

Преимущества предлагаемой модели состоят в следующем:

- выполнение (автоматизация) расчетов для четырех типов судов;
- учет особенностей формы корпуса (параметров нового бульба и кормовой оконечности, формы (угла притыкания) носовой ветви КВЛ, выступающих частей, положения абсциссы центра величины и центра тяжести КВЛ и др.);
- учет геометрических особенностей винта (количество и угол откидки лопастей);
- возможность выбора типа и характеристик главного двигателя из специально созданной базы данных (БД) современных судовых дизельных двигателей (учитывается возможность использования редуктора для высоко- и среднеоборотных двигателей);

- учет количества судов в серии и «интерес» завода в расчетах строительной стоимости;
 - реализация возможности учета курсового угла и высоты волнения;
 - расчет критериев с учетом дисконтирования, указание срока службы судна.
- Представлена принципиальная блок-схема математической модели (рис. 6).

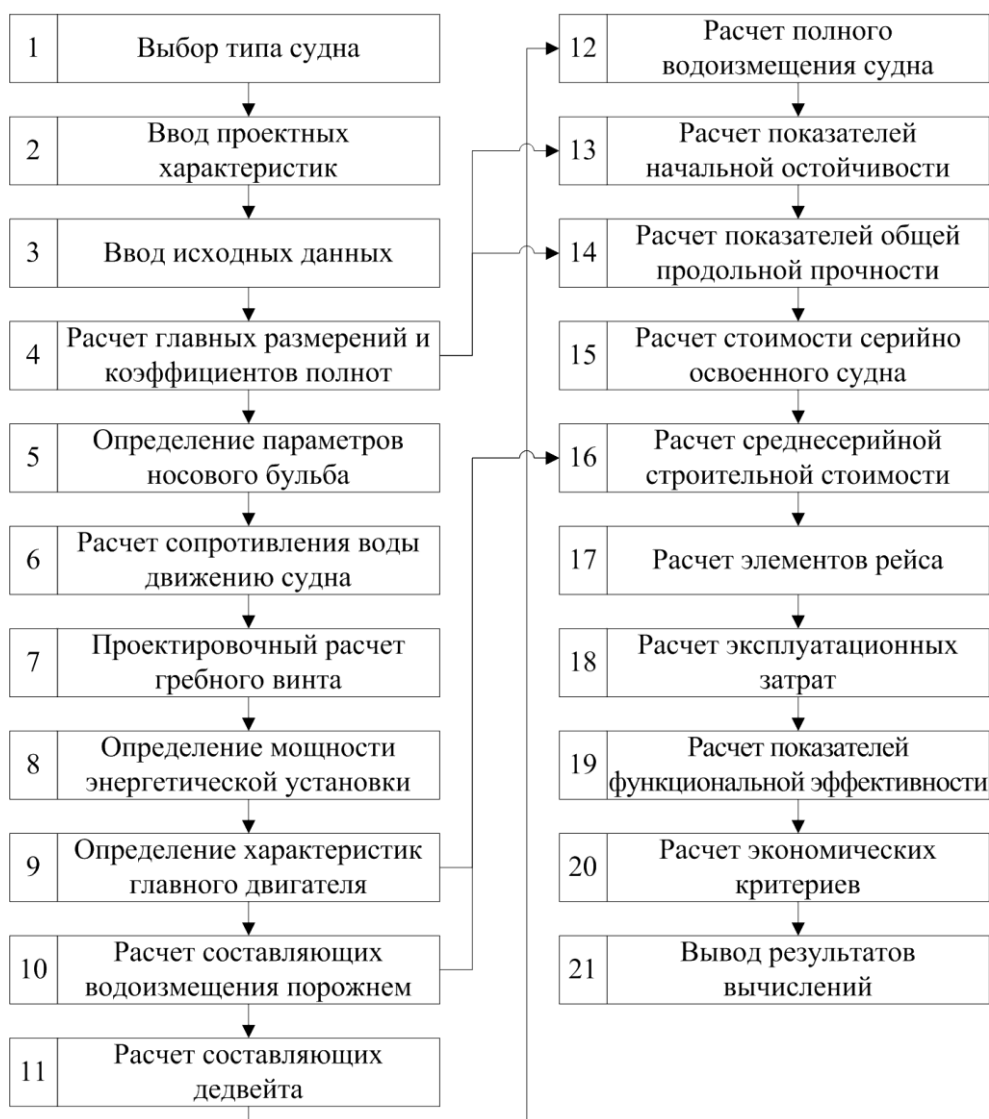


Рис. 6. Принципиальная блок-схема математической модели

В качестве характеристик на рис. 6 приняты скорость и полезная грузоподъемность, а исходные данные – это величины, отражающие условия постройки и эксплуатации судна (количество судов в серии, протяженность линии, стоимость топлива, портовые сборы, тип двигателя, количество лопастей винта, характеристики волнения и др.).

Расчет главных размерений в рассматриваемой модели осуществляется по зависимостям, приведенным ранее в табл. 1, а коэффициенты полнот определяются по формулам, приведенным в источнике [15], в зависимости от типа судна.

Алгоритм проектирования бульбовой оконечности позволяет учитывать тип, форму и основные геометрические параметры бульба. За основу приняты теория и формулы, приведенные в работах [13, 19]. Геометрические параметры носового бульба, учитываемые в математической модели, показаны на рис. 7, где следующие обозначения: НПП – носовой перпендикуляр; ОП – основная плоскость; ВВ – ширина бульба; LPR – длина выступающей за НПП части бульба; НВ – высота; ZB – аппликата самой удаленной от НПП точки; TFT – осадка судна на НПП; АВТ и АВЛ – площади поперечного и продольного сечений бульба соответственно.

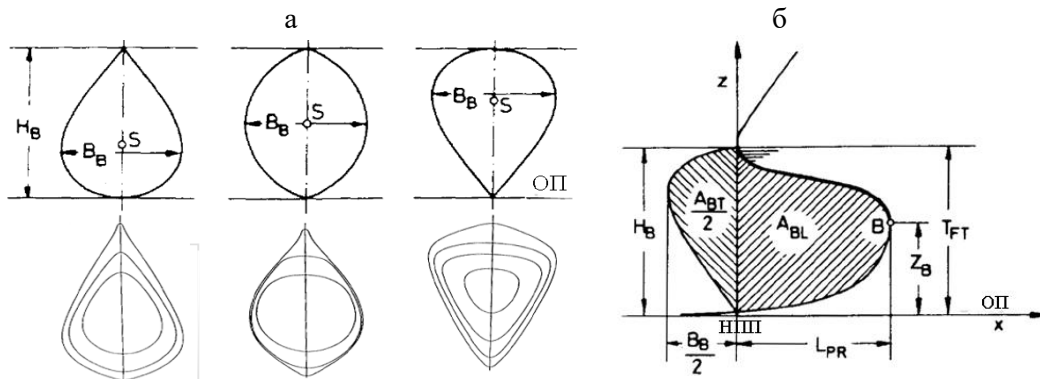


Рис. 7. Геометрические характеристики носового бульба:
а – условные сечения в плоскости НПП; б – проектные параметры

Алгоритм определения геометрических параметров бульба приведен на рис. 8, где использованы следующие обозначения: L_{III} – длина судна между перпендикулярами; L_{BL} – длина судна по КВЛ; B и T – ширина и осадка судна соответственно; C_b и C_M – коэффициент общей полноты и полноты мидель-шпангоута соответственно, V_s – скорость хода судна. Величины C_{LPR} , C_{ZB} , C_{BB} и C_{ABT} характеризуют безразмерные коэффициенты длины, высоты, ширины и полноты поперечного сечения бульба соответственно [13].

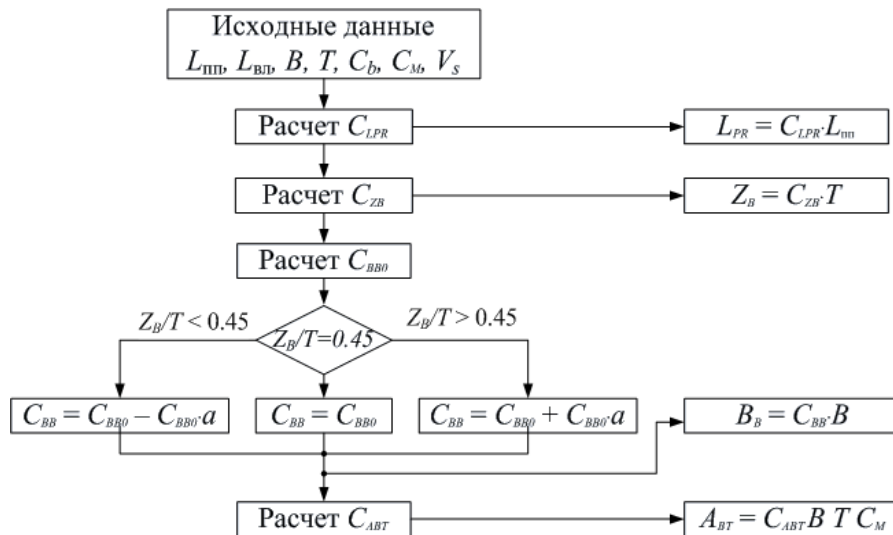


Рис. 8. Алгоритм определения характеристик бульба

Коэффициент длины выступающей части бульба определяется по формуле $C_{LPR} = 0,271 \cdot C_b \cdot B/L - 0,015$.

Коэффициент ширины рассчитывается по следующей зависимости:

$$C_{BB} = (a_{yI} (L/B) + a_y)/100,$$

где $a_y = -13,19 \cdot C_b^2 + 25,54 \cdot C_b - 10,12$ и $a_{yI} = 3,65 \cdot C_b^2 - 4,10 \cdot C_b + 2,33$.

Поправка на отклонение Z_B/T от стандартного значения (0,45) определяется по формуле $a = (0,45 - Z_B/T) \cdot 0,1$.

Значения коэффициентов, характеризующих геометрию бульбов разных типов, приведены в табл. 2.

Сопротивление движению судна рассчитывалось по следующей зависимости:

$$R = R_0 + R_{AA} + R_{AW}, \tag{1}$$

где R_0 – сопротивление на тихой воде; R_{AA} – добавочное сопротивление от ветра; R_{AW} – добавочное сопротивление действия волн.

Диапазоны изменения коэффициентов формы носовых бульбов

Коэффициент	Диапазоны изменения	
	мин.	макс.
C_{BB}	0,170	0,200
C_{LPR}	0,018	0,031
C_{ZB}	0,260	0,550
C_{ABL}	0,068	0,146
C_{ABT}	0,064	0,122

Для сопротивления на тихой воде использовался метод Холтропа и Меннена [12], согласно которому сопротивление на тихой воде определяется по формуле

$$R_0 = R_F(1+k_I) + R_{AP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A, \quad (2)$$

где R_F – сопротивление трения; $1+k_I$ – форм-фактор, характеризующий долю вязкостного сопротивления корпуса судна по отношению к R_F ; R_{AP} – сопротивление выступающих частей; R_W – волновое сопротивление; R_B – сопротивление бульба; R_{TR} – сопротивление погруженной части кормы; R_A – корреляционная составляющая сопротивления модели.

Метода Холтропа позволяет учитывать конструктивные особенности корпуса: бульб, транец, угол входа носовой ветви ватерлинии, выступающие части и др.

Аэродинамическая составляющая в формуле (1) определяется как

$$R_{AA} = C_{AA} \frac{\rho_A v_A^2}{2} S_A, \quad (3)$$

где C_{AA} – коэффициент сопротивления воздуха (рассчитывается по формуле Ишервуда [1]); ρ_A – плотность воздуха; v_A – относительная скорость воздушного потока, м/с; S_A – площадь проекции надводной части корпуса судна на плоскость миделя.

Добавочное сопротивление на волнении рассчитывается по формуле [1]:

$$R_{AW} = \chi_\beta R_{AW}^0, \quad (4)$$

где χ_β – функция влияния курсового угла; R_{AW}^0 – добавочное сопротивление (в расчетах приняты высота волн $h_{3\%} = 1,25$ м, волнение встречное $\beta_w = 180^\circ$).

Сопротивление на встречном волнении:

$$R_{AW}^0 = C_R (100 h_{3\%}/L)^2 I_R(b, n), \quad (5)$$

где C_R – эмпирический параметр; $I_R(b, n)$ – функция, характеризующая отклонение $R_{AW}^0(h_{3\%})$ от квадратичной [1].

Значение b определяется в зависимости от характеристики развитости волнения q_w . Для развитого волнения $q_w = 1$, для развивающегося $q_w < 1$, для ослабевающего $q_w > 1$.

Проектировочный расчет гребного винта выполняется исходя из возможности размещения винта наибольшего диаметра в кормовом подзоре. В основе расчета лежат полиномы, полученные для винтов фиксированного шага серии Трооста (серия В), диапазоны изменения характеристик которых лежат в следующих пределах: число лопастей $2 \leq Z \leq 7$; дисковое отношение $0,4 \leq A_e/A_0 \leq 1,05$; шаговое отношение $0,50 \leq H/D \leq 1,40$; относительная поступь $0 \leq J \leq 1,50$ [1]. Расчет винта выполняется исходя из условия равенства сопротивления движению судна тяге гребного винта, что обеспечивает достижение заданной скорости хода.

Для определения характеристик главного двигателя (фирма изготовитель (*Firm*), модель двигателя (*Model*), номинальная мощность (*Power*), обороты (*Revol*), масса (*Weight*) и количество циклов (*Cycle*)) создана база данных (*Engine.dat*) судовых дизельных двигателей (ABS, AKASAKA, DAHATSU, MAN B&W и др. – всего 564 модели [8]). Алгоритм выбора главного двигателя (ГД) представлен на (рис. 9).

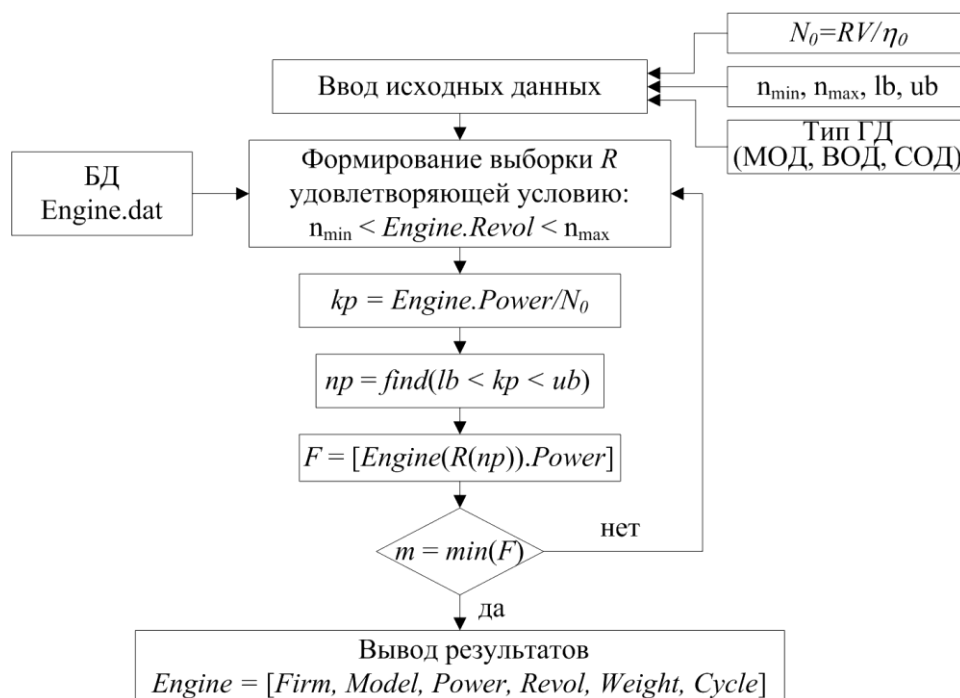


Рис. 9. Алгоритм определения характеристик ГД

На рис. 9 приняты обозначения: n_{min} и n_{max} – диапазон оборотов ГД в об/мин; l_b и u_b – диапазоны изменения коэффициента запаса мощности; N_0 – расчетное значение мощности ГД в кВт; V – скорость хода в м/с; η_0 – пропульсивный коэффициент; kp – коэффициент (характеризует отношение мощностей ГД из БД к расчетному значению); np – индексы элементов, удовлетворяющих диапазонам изменения коэффициента запаса мощности; F – массив ГД, удовлетворяющий диапазонам l_b и u_b ; m – масса ГД.

Тип двигателя:

- малооборотный (МОД) $80 < n < 350$;
- среднеоборотный (СОД) $350 < n < 750$;
- высокооборотный (ВОД) $750 < n < 2500$.

Водоизмещение порожнем рассчитывалось по формуле [21]:

$$D_0 = W_s + W_{eq} + W_m, \tag{6}$$

где W_s – масса стальных конструкций (корпуса, надстроек, фундаментов машин и механизмов, мачт, трапов и др.); W_{eq} – масса оборудования, оснастки, палубных машин и механизмов; W_m – масса ГД и механизмов, расположенных в машинном отделении.

Масса корпусных конструкций определяется по формуле

$$W_s = W_h + W_{sps}, \tag{7}$$

где W_h – масса корпуса; W_{sps} – суммарная масса надстроек.

Для определения массы корпуса судна используется формула

$$W_h = k_{h1} L^{kh2} B^{kh3} H^{kh4}, \tag{8}$$

где L, B, H – длина, ширина и высота борта судна соответственно; $k_{h1}, k_{h2}, k_{h3}, k_{h4}$ – коэффициенты, зависящие от типа судна (табл. 3) [21].

Таблица 3

Значения коэффициентов k в зависимости от типа судна

Тип судна	k_{h1}	k_{h2}	k_{h3}	k_{h4}
Танкер	0,0361	1,60	1,0	0,220
Балкер	0,0328	1,60	1,0	0,220
Контейнеровоз	0,0293	1,760	0,712	0,374
УСС	0,0313	1,675	0,850	0,280

Масса надстройки в зависимости от типа судна рассчитывается по формуле [21]:

- УСС: $W_{sps} = 10 \div 12 \% W_h$;
- Танкер: $W_{sps} = 6 \div 8 \% W_h$;
- Балкер: $W_{sps} = 6 \div 7 \% W_h$.

Масса оборудования, снаряжения, оснастки, палубных машин и механизмов определяется по формуле

$$W_{eq} = k_{e1} (L B H)^{k_{e2}}, \tag{9}$$

где L, B, H – длина, ширина и высота борта судна соответственно; k_{e1}, k_{e2} – коэффициенты, зависящие от типа судна (табл. 4) [21].

Таблица 4

Значения коэффициентов k_{e1}, k_{e2}

Тип судна	k_{e1}	k_{e2}
Танкер	10,820	0,410
Балкер	6,1790	0,480
Контейнеровоз	0,1156	0,850
УСС	0,5166	0,750

Масса главного двигателя и механизмов, расположенных в машинном отделении:

$$W_m = k_{m1} \cdot Power^{k_{m2}}, \tag{10}$$

где k_{m1}, k_{m2} – коэффициенты, зависящие от типа ГД [21].

Дедвейт рассчитывается по формуле

$$DW = P_g + P_{cr} + P_{fl} + P_b, \tag{11}$$

где P_g – полезная грузоподъемность; P_{cr} – масса экипажа с багажом, провизией и пресной водой; P_{fl} – запасы топлива и смазочного масла для ГД; P_b – балласт (при необходимости).

Количество членов экипажа в модели рассчитывается по формуле

$$n_{\text{ЭК}} = k_{e1} + k_{e2} (L B H)/1000 + k_{e3} N_{\text{ЭД}}, \tag{12}$$

где k_{e1}, k_{e2}, k_{e3} – коэффициенты, зависящие от страны найма и типа судна [21].

Алгоритм расчета водоизмещения (рис. 10) основан на итерационной процедуре, связанной с подбором заданного параметра в рассматриваемом выражении (в представленной модели это DW судна). Вычисления выполняются до тех пор, пока расчетное значение грузоподъемности P_{gc} не будет равно заданному (проектному) значению P_g судна.

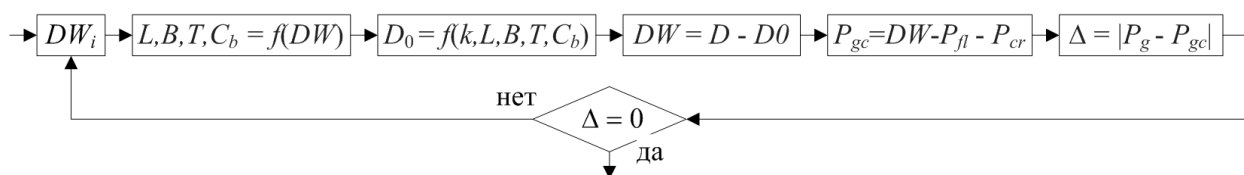


Рис. 10. Алгоритм расчета водоизмещения и составляющих нагрузки

Показатели остойчивости рассчитывались по Правилам [5], как для судов с круглым скуловым килем. Слагаемые в формуле метацентрической высоты определялись с учетом рекомендаций [4, 5].

Прочность оценивалась по изгибающему моменту, действующему на судно:

$$M = D \cdot L/k, \tag{17}$$

где D – водоизмещение судна в грузу; k – коэффициент, зависящий от типа судна [2].

Строительная стоимость судна определяется по формуле [21]:

$$K_s = Q_b (1 + K_a). \tag{13}$$

где K_a – коэффициент дополнительных затрат на постройку.

Базовая составляющая строительной стоимости судна определяется по формуле [21]:

$$Q_b = (K_h + K_{eq} + K_m + X_s) (1 + K_b), \quad (14)$$

где K_b – интерес завода в процентах; K_h – стоимость корпуса; K_{eq} – стоимость оборудования корпуса; K_m – стоимость оборудования машинного отделения (МО); X_s – стоимость оборудования, размещенного на верхней палубе (краны, шпильки, лебедки и др.).

Стоимость серийно освоенного судна:

$$K = \frac{K_s}{x^b}, \quad (15)$$

где x – количество судов в серии; b – коэффициент серийности (рис. 11) [18].

Формула для определения коэффициента серийности следующая:

$$b = 0,9996 \cdot x^{-0,097}. \quad (16)$$

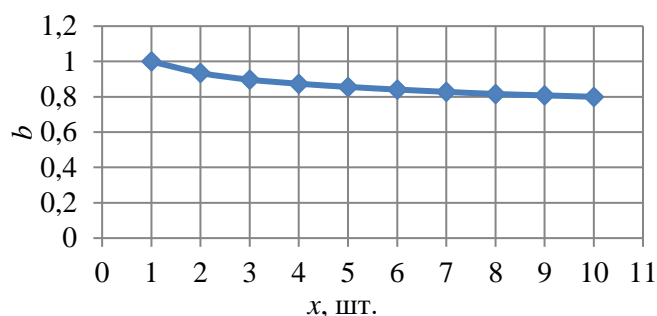


Рис. 11. Зависимость коэффициента b от количества судов в серии

Расчет элементов рейса учитывает ходовое, стояночное время и другие показатели, используемые в расчетах технико-экономического обоснования [7].

Время проведения погрузочно-разгрузочных операций:

$$T_{pr} = 2 ((P_g/q_{lu}) + t_a), \quad (18)$$

где q_{lu} – нормы погрузочно-разгрузочных работ; t_a – вспомогательное время.

Количество рейсов судна в течение года:

$$n_{rt} = T_{yr} / (T_r + T_{pr}), \quad (19)$$

где T_{yr} – период навигации судна; T_r – время рейса; T_{pr} – время погрузки / разгрузки.

Годовой объем перевозок:

$$Q = P_g n_{rt}. \quad (20)$$

Эксплуатационные расходы судна вычисляются по формуле [21]:

$$C_A = C_{adm} + C_r + C_v, \quad (21)$$

где C_{adm} – административные отчисления; C_r – расходы, связанные с обслуживанием и эксплуатацией судна; C_v – рейсовые расходы.

Расходы на обслуживание и эксплуатацию определяются по формуле [21]:

$$C_r = C_{cr} + C_{sup} + C_{mr} + C_{ins} + C_{dock}, \quad (22)$$

где C_{cr} – затраты на содержание экипажа; C_{sup} – затраты на снабжение; C_{mr} – затраты на содержание оборудования и ремонт; C_{ins} – страховка; C_{dock} – затраты на докование.

Рейсовые расходы определяются по формуле [21]:

$$C_v = C_f + C_{pd} + C_{tp} + C_{cd}, \quad (23)$$

где C_f – затраты на топливо; C_{pd} – портовые и маячные сборы; C_{tp} – затраты на буксировку и лоцманскую проводку; C_{cd} – плата за проход каналов (канальные сборы).

Для оценки эффективности рассчитываются как статические, так и динамические показатели, формулы для которых приведены ниже.

Себестоимость эксплуатации судна (транспортные издержки) [7]:

$$TRC = \frac{C_A}{Q}. \tag{24}$$

Требуемая фрахтовая ставка [15]:

$$RFR = \frac{(CR)K_s + C_A}{Q}. \tag{25}$$

Чистый приведенный доход [14]:

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{A'}{(1+i)^t} - K, \tag{26}$$

где i_d – коэффициент дисконтирования; N – нормативный срок службы судна; A' – годовой доход после уплаты налога.

Результаты моделирования

В настоящем разделе приведены примеры результатов расчетов, выполненных с использованием вышеописанной математической модели для следующих исходных данных: количество ходовых дней – 340 суток, протяженность линии – 2000 миль, стоимость топлива – 850 долл./т. Значения проектных скоростей хода (средние по статистике значения) приняты следующие: 14,00 уз. – навалочники, 14,50 уз. – танкера, 21,50 уз. – контейнеровозы. Отдельно задавались тип ГД, нормы грузообработки, страна найма экипажа, ставки портовых сборов и др. На рис. 12 показаны примеры сравнения данных судов-прототипов с расчетными значениями, полученными по формулам, приведенным в табл. 1, в зависимости от дедвейта и контейнеровместимости.

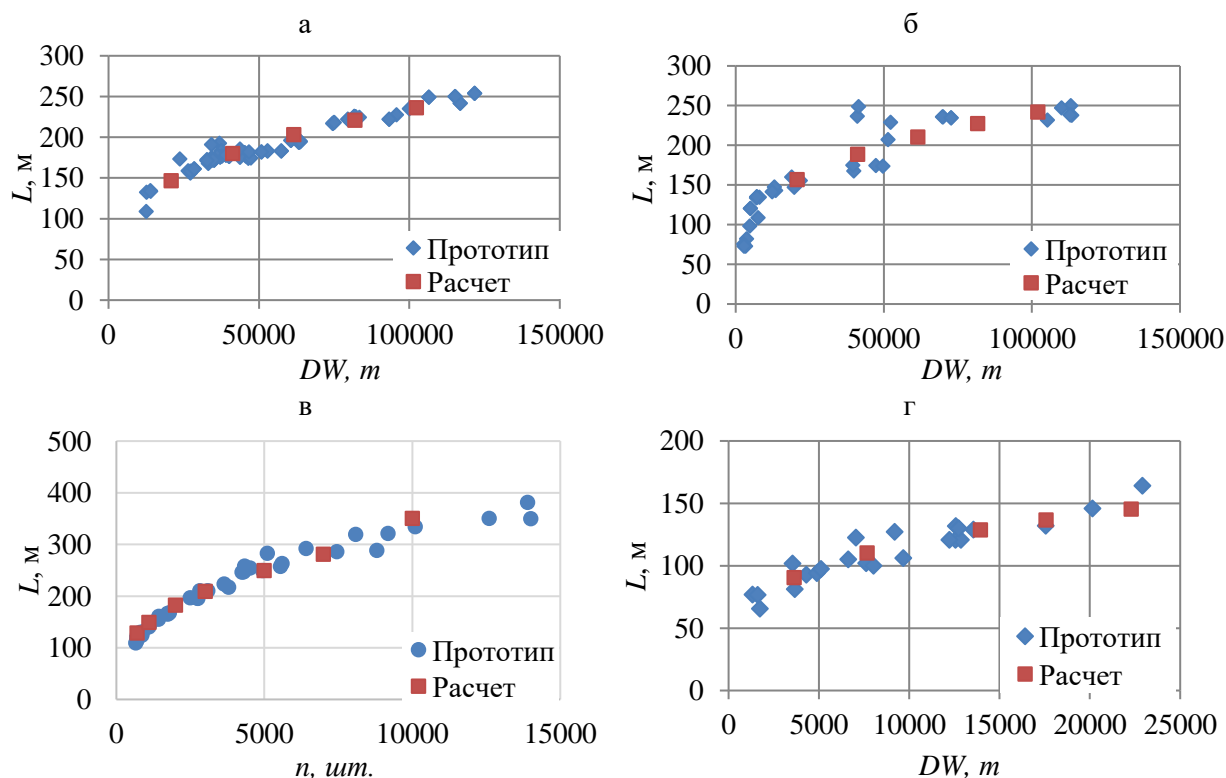


Рис. 12. Зависимость расчетной длины от дедвейта и контейнеровместимости: а – навалочники; б – нефтетанкеры; в – контейнеровозы; г – УСС

В табл. 5–8 показаны результаты моделирования. Скорость и грузоподъемность (контейнеровместимость) приняты в качестве параметров. Главные размерения, характеристики главного двигателя, дедвейт, годовой доход (A), себестоимость эксплуатации (TRC), строительная стоимость (K) и другие показатели определялись по алгоритму, представленному на рис. 6.

В качестве примера в табл. 9 для навалочника грузоподъемностью $Pg = 70000$ т и исходных данных, приведенных выше, даны уточненные результаты вычислений.

Таблица 5

Главные размеры и характеристики навалочников

P_g , т	20000	40000	60000	80000	100000
L , м	146,50	180,07	203,03	221,08	236,23
B , м	23,96	29,29	32,95	35,83	38,26
T , м	9,08	11,04	12,39	13,44	14,33
H , м	12,68	15,68	17,77	19,42	20,81
N , кВт	4720	7080	9170	11200	13320
Модель ГД	mitsubishi 4UEC52LA	mitsubishi 6UEC52LA	MAN B&W 7S46MC-C	WARTSILA SULZER 7RTA52U-B	WARTSILA SULZER 6RTA62U
DW , т	20793	41225	61557	81889	102321
L/B	6,12	6,15	6,16	6,17	6,17
B/T	2,64	2,65	2,66	2,67	2,67
K , млн. долл.	3,32	28,58	47,28	60,53	69,31

Таблица 6

Главные размеры и характеристики танкеров

P_g , т	20000	40000	60000	80000
L , м	164,89	194,95	215,35	231,14
B , м	25,87	31,77	35,89	39,15
T , м	9,04	11,21	12,75	13,97
H , м	12,82	15,93	18,12	19,87
N_{20} , кВт	5125	7080	8850	10480
Модель ГД	MAN B&W - 5S42MC	mitsubishi - 6UEC52LA	mitsubishi - 5UEC60LS	MAN B&W - 8S46MC-C
DW , т	24 880,53	46 089,53	66 498,53	86 307,53
L/B	6,37	6,14	6,00	5,90
B/T	2,86	2,83	2,82	2,80
K , млн. долл.	15,59	40,25	57,62	69,43

Таблица 7

Главные размеры и характеристики контейнеровозов

n , шт.	700	1100	2000	5000	7000	10000
L , м	128,32	149,17	182,49	249,53	280,90	350,21
B , м	21,09	23,93	28,37	37,04	40,99	49,55
T , м	8,56	9,42	10,71	13,10	14,14	14,00
H , м	11,09	12,78	15,48	20,88	23,40	28,96
N_{20} , кВт	10115	12000	15540	24560	30 880	43320
Модель ГД	mitsubishi HI7UEC50L SII	WARTSILA SULZER 6RTA58T	WARTSILA SULZER 7RTA62U	WARTSILA SULZER 8RT-flex68T	mitsubishi UEC85LSII	MAN B&W 12K80MC-C
DW , т	11421	16777	28180	63455	86438	154014
L/B	6,08	6,23	6,43	6,74	6,85	7,07
B/T	2,46	2,54	2,65	2,83	2,90	3,54
	19,93	20,84	23,91	28,83	43,31	19,93

Таблица 8

Главные размеры и характеристики УСС

V_s , уз.	11,5	14,3	15,1	16,5	18,1
P_g , т	3300	6100	11100	13000	15100
L , м	90,47	110,12	128,66	136,66	145,38
B , м	15,17	17,95	20,52	21,61	22,79
T , м	5,44	7,15	8,88	9,66	10,53
H , м	7,23	9,50	11,81	12,85	14,02
$N_{\text{сд}}$, кВт	1 030	2 600	3 860	5 600	8 955
Модель ГД	MAN B&W -	MAN B&W -	MITSUBISHI -	MAN B&W -	MAN B&W -
DW , т	3 629	7 685	13 949	17 583	22 299
L/B	5,96	6,14	6,27	6,32	6,38
B/T	2,79	2,51	2,31	2,24	2,16
K , млн. долл	9,26	17,7	25,02	30,06	36,3

Таблица 9

Пример результатов вычислений

Характеристики и элементы судна		Характеристики носового бульба	
P_g , т	70 000	L_{pr} , м	4,79
V_s , уз.	14,00	B_b , м	3,92
D , т	87 076	H_b , м	4,74
DW , т	76 553	A_{br} , м	48,32
L , м	216,6	Характеристики гребного винта	
B , м	35,1	D_p , м	7,70
T , м	13,8	P/D	0,975
H , м	19,02	A_e/A_0	0,560
C_b	0,846	Характеристики главного двигателя	
C_m	0,993	Тип ГД	WARTSILA SULZER
C_{wp}	0,846	Модель ГД	5RTA58T
Экономические показатели		n , об/мин.	103
K , млн. долл.	41,56	$N_{\text{сд}}$, кВт	10000
TRC , долл./т	6,80	W_m , т	280
A , млн долл.	12,46	Количество циклов	2

Из анализа результатов вычислений, представленных на рис. 12, 13, и данных табл. 5–8 следует, что расчетные значения главных размерений и основных проектных характеристик в полной мере согласуются с данными судов-прототипов, находящихся в эксплуатации. Таким образом, разработанная математическая модель и созданная на ее основе программа для ЭВМ могут использоваться на начальных стадиях проектирования для предварительных расчетов главных размерений и характеристик грузовых судов (балкеры, танкеры, контейнеровозы и универсальные сухогрузные суда), а также в целях сравнительной оценки их функциональной эффективности в заданных условиях эксплуатации. Кроме того, интеграция разработанной математической модели со специализированными программными продуктами, предназначенными для корпусного моделирования (например, Orca3D, FastShip, MaxSurf и др.), позволит связать результаты расчетов и трехмерную параметризованную модель корпуса судна.

Заключение

В статье рассмотрена математическая модель, предназначенная для автоматизации расчетов, выполняемых на начальных стадиях проектирования морских грузовых судов (танкеры,

балкеры, контейнеровозы и универсальные сухогрузы). В результате анализа данных судов-прототипов получены формулы для расчета главных размерений.

В расчетах ходкости учитываются характеристики формы корпуса и носового бульба, погруженного транца и выступающих частей. Характеристики главного двигателя выбираются из созданной базы данных современных двигателей. Приводятся результаты тестовых расчетов и их сравнение с данными судов-прототипов.

Математическая модель реализована в виде программы для ЭВМ и может использоваться на начальных этапах проектирования для автоматизации расчетов главных размерений и характеристик судов, а также в целях сравнительной оценки их функциональной эффективности на различных направлениях перевозок.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Войткунский Я.И. Иванов А.Н., Луговский В.В. Справочник по теории корабля: Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. Ленинград: Судостроение, 1985. 764 с.
2. Максимаджи А.И. Капитану о прочности корпуса судна: справочник. Ленинград: Судостроение, 1988. 224 с.
3. Мацкевич В.А., Мацкевич А.В. Практическое проектирование транспортных судов. В 2 ч. Москва: Недра, 2015. Ч. 1. 194 с.
4. Мацкевич В.А., Мацкевич А.В. Практическое проектирование транспортных судов. В 2 ч. Москва: Недра, 2015. Ч. 2. 168 с.
5. Правила классификации и постройки морских судов. Часть IV. Остойчивость. Санкт-Петербург, 2022. 80 с.
6. Российский морской регистр судоходства. URL: <https://lk.rs-class.org> (дата обращения: 23.05.2022).
7. Соколов В.П. Постановка задач экономического обоснования судов. Ленинград: Судостроение, 1987. 162 с.
8. A comprehensive A-Z listing of marine diesel engines in excess of 300 kW. The definitive guide to marine engines. 2005. 39 p.
9. Age distribution of the world merchant fleet in 2019-2020, by vessel type. URL: <https://www.statista.com/statistics/1102442/age-of-world-merchant-fleet-by-vessel-type> – 23.05.2022.
10. American Bureau of Shipping. URL: <https://www.eagle.org> – 23.05.2022.
11. Emission Control Areas (ECAs). URL: <https://www.imo.org> – 23.05.2022.
12. Holtrop J., Mennen G.G.J. An approximate power prediction method. *International Shipbuilding Progress*. 1982;29(335):166–170.
13. Kracht A.M. Design of Bulbous Bows. *Transactions SNAME*. 1978;86:197–217.
14. Benford H. A naval architect's guide to practical economics. Department of naval architecture and marine engineering University of Michigan. 1991. 134 p.
15. Misra S.C. Design Principles of Ships and Marine Structures. CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida, United States, 2015. 500 p.
16. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. Cambridge, Cambridge University Press, 2011. 568 p.
17. Number of ships in the world merchant fleet as of January 1, 2021, by type. URL: <https://www.statista.com> – 23.05.2022.
18. Papanikolaou A., Ship design: methodologies of preliminary design. SPRINGER, 2014. 628 p.
19. Sharma R., Sha O.P. Practical Hydrodynamic Design of Bulbous Bows for Ships. *Naval Engineers Journal*. 2005;117(1):57–76.
20. UNCTAD Handbook of Statistics. URL: <https://hbs.unctad.org/merchant-fleet> – 23.05.2022.
21. Ventura M. Estimation methods for basic ship design. MSc in marine engineering and naval architecture ship design. Part 1. Lecture notes. 2004. 51 p.
22. Vessel register for DNV. URL: <https://vesselregister.dnv.com> – 23.05.2022.

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/42-58>

Kitaev M., Tyuftyaev D., Tortyzheva D.

MAKSIM V. KITAEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
kitaev.mv@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5345-6333>

DMITRY V. TYUFTYAEV, Student, tyuftyaev.dv@students.dvfu.ru

DARYA A. TORTYZHEVA, Student, tortyzheva.da@students.dvfu.ru

Polytechnic Institute

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Mathematical model for cargo vessel design

Abstract. The article considers a mathematical model designed to automate calculations performed at the initial stages of designing marine cargo ships (tankers, bulk carriers, container ships and universal dry cargo ships). To determine the main dimensions and coefficients of completeness in the model, formulas are used, the results of a statistical analysis of the data of modern prototype ships. In the calculation of propulsion using the Holtrop method, the features of the contours and shape of the hull, the characteristics of the nasal bulb are taken into account. To determine the hydrodynamic and geometric characteristics of the propeller, approximating polynomials are used, obtained for the thrust and moment coefficients of propellers of the B-series. The characteristics of the main engine are selected according to a special algorithm from the database of marine diesel engines produced both in our country and abroad, created by the authors. The main indicators of stability and strength of the designed ships are calculated. The initial data are speed, carrying capacity and quantities characterizing the conditions for the design, construction and operation of ships. The results include the main dimensions and coefficients of completeness, displacement and load components, construction cost and economic indicators of functional efficiency. Functional efficiency and economic indicators are evaluated taking into account the design life of the vessel and inflation. The mathematical model is implemented as a computer program and can be used at the initial stages of design to automate calculations and express assessment of the characteristics, elements and economic efficiency of candidate ships for given lines of operation.

Keywords: ship design, mathematical model, computational automation, functional efficiency, economic indicators

For citation: Kitaev M., Tyuftyaev D., Tortyzheva D. Mathematical model for cargo vessel design. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):42–58. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Voytkunsky Ya.I. Ivanov A.N., Lugovsky V.V. Handbook of ship theory. Vol. 1. Hydromechanics. Resistance to the movement of ships. Ship movers. Leningrad, Shipbuilding, 1985. 764 p. (In Russ.).
2. Maksimadzhi A.I. To the captain about the strength of the ship's hull: a Handbook. Leningrad, Shipbuilding, 1988. 224 p. (In Russ.).
3. Matskevich V.A., Matskevich A.V. Practical design of transport ships. In 2 parts. Moscow, Nedra, 2015. Part 1. 194 p. (In Russ.).
4. Matskevich V.A., Matskevich A.V. Practical design of transport ships. In 2 parts. Part 2. Moscow, Nedra, 2015. 168 p. (In Russ.).
5. Rules for the classification and construction of ships. Part IV. Stability. St. Petersburg. 2022. 80 p. (In Russ.).
6. Russian Maritime Register of Shipping. URL: <https://lk.rs-class.org> – 23.05.2022. (In Russ.).
7. Sokolov V.P. Statement of tasks of economic substantiation of courts. Leningrad, Shipbuilding, 1987. 162 p. (In Russ.).

8. A comprehensive A-Z listing of marine diesel engines in excess of 300 kW. The definitive guide to marine engines. 2005. 39 p.
9. Age distribution of the world merchant fleet in 2019-2020, by vessel type. URL: <https://www.statista.com/statistics/1102442/age-of-world-merchant-fleet-by-vessel-type> – 23.05.2022.
10. American Bureau of Shipping. URL: <https://www.eagle.org> – 23.05.2022.
11. Emission Control Areas (ECAs). URL: <https://www.imo.org> – 23.05.2022.
12. Holtrop J., Mennen G.G.J. An approximate power prediction method. *International Shipbuilding Progress*. 1982;29(335):166–170.
13. Kracht A.M. Design of Bulbous Bows. *Transactions SNAME*. 1978;86:197–217.
14. Benford H. A naval architect's guide to practical economics. Department of naval architecture and marine engineering University of Michigan. 1991. 134 p.
15. Misra S.C. Design Principles of Ships and Marine Structures. CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida, United States, 2015. 500 p.
16. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. Cambridge, Cambridge University Press, 2011. 568 p.
17. Number of ships in the world merchant fleet as of January 1, 2021, by type. URL: <https://www.statista.com> – 23.05.2022.
18. Papanikolaou A., Ship design: methodologies of preliminary design. SPRINGER, 2014. 628 p.
19. Sharma R., Sha O.P. Practical Hydrodynamic Design of Bulbous Bows for Ships. *Naval Engineers Journal*. 2005;117(1):57–76.
20. UNCTAD Handbook of Statistics. URL: <https://hbs.unctad.org/merchant-fleet> – 23.05.2022.
21. Ventura M. Estimation methods for basic ship design. MSc in marine engineering and naval architecture ship design. Part 1. Lecture notes. 2004. 51 p.
22. Vessel register for DNV. URL: <https://vesselregister.dnv.com> – 23.05.2022.

Технология и организация судостроения и судоремонта

Научная статья

УДК 621.793

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/59-68>

Л.Б. Леонтьев, А.Л. Леонтьев

ЛЕОНТЬЕВ ЛЕВ БОРИСОВИЧ – д.т.н., профессор Политехнического института,
leontyev.l.b@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8072-306X>*Дальневосточный федеральный университет*ЛЕОНТЬЕВ АНДРЕЙ ЛЬВОВИЧ – к.т.н., министр энергетики и газоснабжения,
gfi25leontev@mail.ru*Правительство Приморского края*

Владивосток, Россия

Концепция конструктивно-технологического обеспечения долговечности триботехнических узлов судового оборудования

Аннотация. Целью работы является разработка концепции конструктивно-технологического обеспечения долговечности трибоузлов судового оборудования при восстановлении и упрочнении деталей сопряжения на основе системного подхода путем формирования оптимального комплекса параметров материала износостойкого покрытия. Разрабатываемая концепция конструктивно-технологического обеспечения долговечности триботехнических узлов судового оборудования, основанная на системном подходе, предлагает алгоритм решения проблемы и позволяет разрабатывать технологические процессы формирования покрытий, обеспечивающие заданный ресурс сопряжения при приемлемой экономической эффективности.

Ключевые слова: долговечность, технологический процесс, восстановление, упрочнение, трибоузел, судовое оборудование, системный подход

Для цитирования: Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л. Концепция конструктивно-технологического обеспечения долговечности триботехнических узлов судового оборудования // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 59–68.

Введение

Старение и уменьшение количества однотипного оборудования на вновь приобретаемых судах, как правило бывших в эксплуатации различными судовладельцами, делает проблему восстановления изношенных деталей и повышения их долговечности экономически целесообразной и весьма актуальной [5].

Эффективность технической эксплуатации судов морского и рыбопромыслового флотов в значительной степени зависит от долговечности и технического состояния главных и вспомогательных дизелей.

Опыт эксплуатации судовых дизелей показывает, что долговечность их использования до проведения ремонтов определяется параметрами технического состояния деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и подшипников коленчатого вала. Повышение ресурса данных трибоузлов для увеличения межремонтных периодов судовых дизелей является одной из важнейших проблем для технологов судоремонтных предприятий и научных сотрудников отрасли.

Износ даже одной детали сопряжения до величины, близкой к предельно-допустимой, требует перехода на ремонтный размер деталей сопряжения, то есть замены одной из деталей сопряжения для обеспечения нормативного зазора. Следует отметить, что детали ремонтного

размера имеют стоимость намного больше, чем детали номинального размера, и срок их поставки может достигать нескольких месяцев. Необходимо также учитывать, что в настоящее время доля стоимости иностранных комплектующих в структуре стоимости судового оборудования составляет для гражданского сектора от 40 до 85 % [10].

Несмотря на большой объем исследований в области повышения износостойкости, различными технологическими методами до сих пор не обеспечиваются потребности практики по созданию долговечных узлов трения вследствие многообразия механизмов изнашивания и большого числа факторов, влияющих на износ конкретного трибоузла [1–4, 7–9].

В связи с этим возникает проблема совершенствования управления технологическими процессами формирования параметров износостойких покрытий, которая заключается в создании условий наиболее полного и точного удовлетворения технических требований и показателей долговечности деталей при минимальных трудовых, материальных ресурсах и финансовых затратах, необходимых для восстановления или упрочнения деталей трибоузлов и эксплуатации отремонтированного судового оборудования. Достигается это путем оптимизации параметров технологических факторов процессов формирования износостойких покрытий. Показатели технико-экономической целесообразности являются ограничивающими условиями и определяют требования к формированию параметров покрытия в пределах допуска. Общий методологический подход к решению задачи формирования заданных эксплуатационных свойств можно сформулировать как достижение таких параметров материала покрытия деталей, которые обеспечили бы заданную долговечность при различных условиях работы сопряжения.

Цель статьи – разработка концепции конструктивно-технологического обеспечения долговечности трибоузлов судового оборудования при восстановлении и упрочнении деталей сопряжения на основе системного подхода путем формирования оптимального комплекса параметров материала износостойкого покрытия.

Термины и определения. Формирование параметров материала покрытия представляет собой совокупность последовательных, случайно распределенных воздействий, обеспечивающих получение заданных физико-механических, структурных, геометрических и других свойств деталей судового оборудования. Формирование параметров износостойкого покрытия включает в себя два процесса: конструктивно-технологическое формирование параметров покрытия (КТФПП) и эксплуатационное формирование параметров (ЭФП), причем эксплуатационные параметры в значительной степени определяются конструктивно-технологическими.

Под процессом *восстановления деталей формированием износостойкого покрытия* понимается нанесение слоя толщиной, необходимой для получения номинального размера детали согласно рабочему чертежу.

Под процессом *упрочнения деталей формированием износостойкого покрытия* понимается получение тонкопленочного слоя, при котором размер детали находится в пределах допуска.

Критериальный параметр – это параметр, изменение которого ограничивает долговечность детали или узла под воздействием эксплуатационных факторов.

Методология системного проектирования технологических процессов восстановления и упрочнения деталей

Формирование параметров износостойкого покрытия восстанавливаемых и упрочняемых деталей базируется на исследовании взаимосвязей между элементами системы «технология–износостойкое покрытие–условия эксплуатации» (ТПЭ), декомпозиции, анализа, минимизации, синтезе, то есть проблема повышения долговечности трибоузлов может быть решена при использовании системного подхода. Системный подход предполагает учет всех этих взаимосвязей, анализ отдельных частей системы ТПЭ как ее самостоятельных структурных составляющих, а также определение влияния каждой из них в функционировании всей системы в целом (рис. 1).

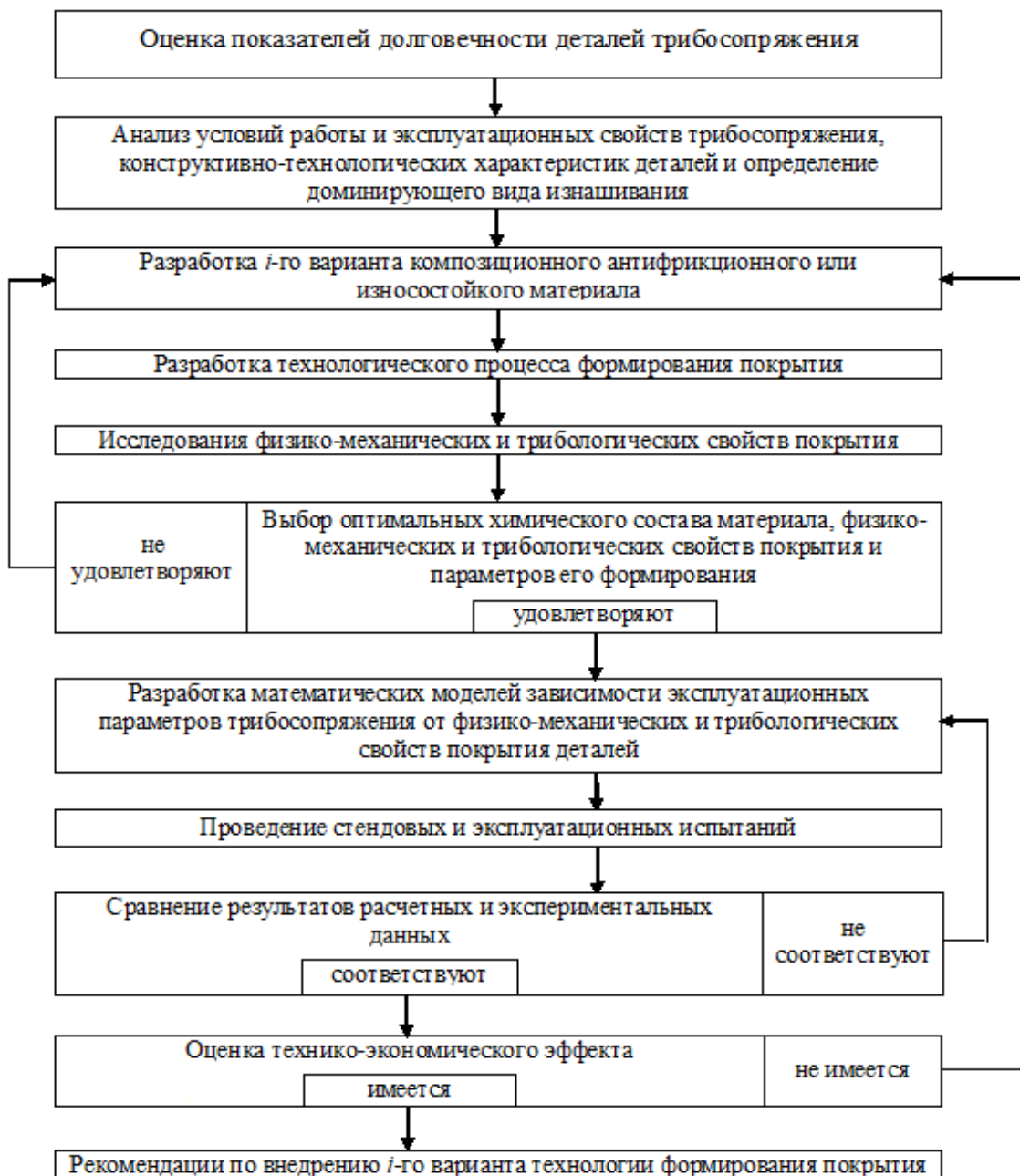


Рис. 1. Концептуальная блок-схема обеспечения заданной долговечности узла трения путем проектирования конструктивно-технологического процесса формирования износостойкого или антифрикционного покрытия

Следует отметить, что основные исследования триботехнических свойств пары трения выполняются на машинах трения, которые не позволяют полностью моделировать эксплуатационные условия в конкретном сопряжении, что оказывает существенное влияние на достоверность результатов испытаний, поэтому кроме лабораторных испытаний необходимо проводить стендовые и натурные исследования оборудования для уточнения результатов модельных испытаний (см. рис. 1).

Методология системного анализа системы ТПЭ состоит из нескольких этапов [6], причем на первом этапе выполняется анализ факторов, влияющих на долговечность деталей триботехнического узла, так как скорость изнашивания деталей зависит не только от их конструктивно-технологических особенностей, формирующих качество и необходимые эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали при трении, но и от условий работы деталей, а также от эксплуатационных свойств сопряжения и изменений характеристик поверхностных слоев в процессе эксплуатации (рис. 2).



Рис. 2. Блок-схема анализа факторов, влияющих на долговечность узла трения

В процессе эксплуатации оборудования и, соответственно, трибосопряжения в зоне контакта происходят не только механические, но и физико-химические процессы. В зоне контакта сопряжения выделяется тепло, изменяются микроструктура и топография поверхностей, образуются новые вещества. В этом активно участвуют окружающая среда, смазка и содержащиеся в ней продукты износа. При постоянных внешних условиях трения и вида контактирования структурные факторы и физико-механические свойства поверхностного слоя в значительной степени определяют триботехнические характеристики сопряжения. Следовательно, наиболее перспективными объектами управления для обеспечения заданной долговечности сопряжения являются химический состав и структура износостойкого покрытия, которые определяют физико-механические и, соответственно, триботехнические характеристики пары трения в условиях трения при граничной смазке.

Проблему конструктивно-технологического обеспечения долговечности триботехнических узлов можно разбить на три взаимосвязанных этапа (рис. 3) [5, 6]:

1) проектирование технологического процесса восстановления или упрочнения детали сопряжения и его практическую реализацию;

2) эксплуатация трибоузла с восстановленной или упрочненной деталью и оценка его долговечности;

3) совершенствование технологии и организации технологического процесса восстановления или упрочнения деталей по результатам подконтрольной эксплуатации трибоузла в составе оборудования в целях повышения долговечности, если ресурс недостаточен.

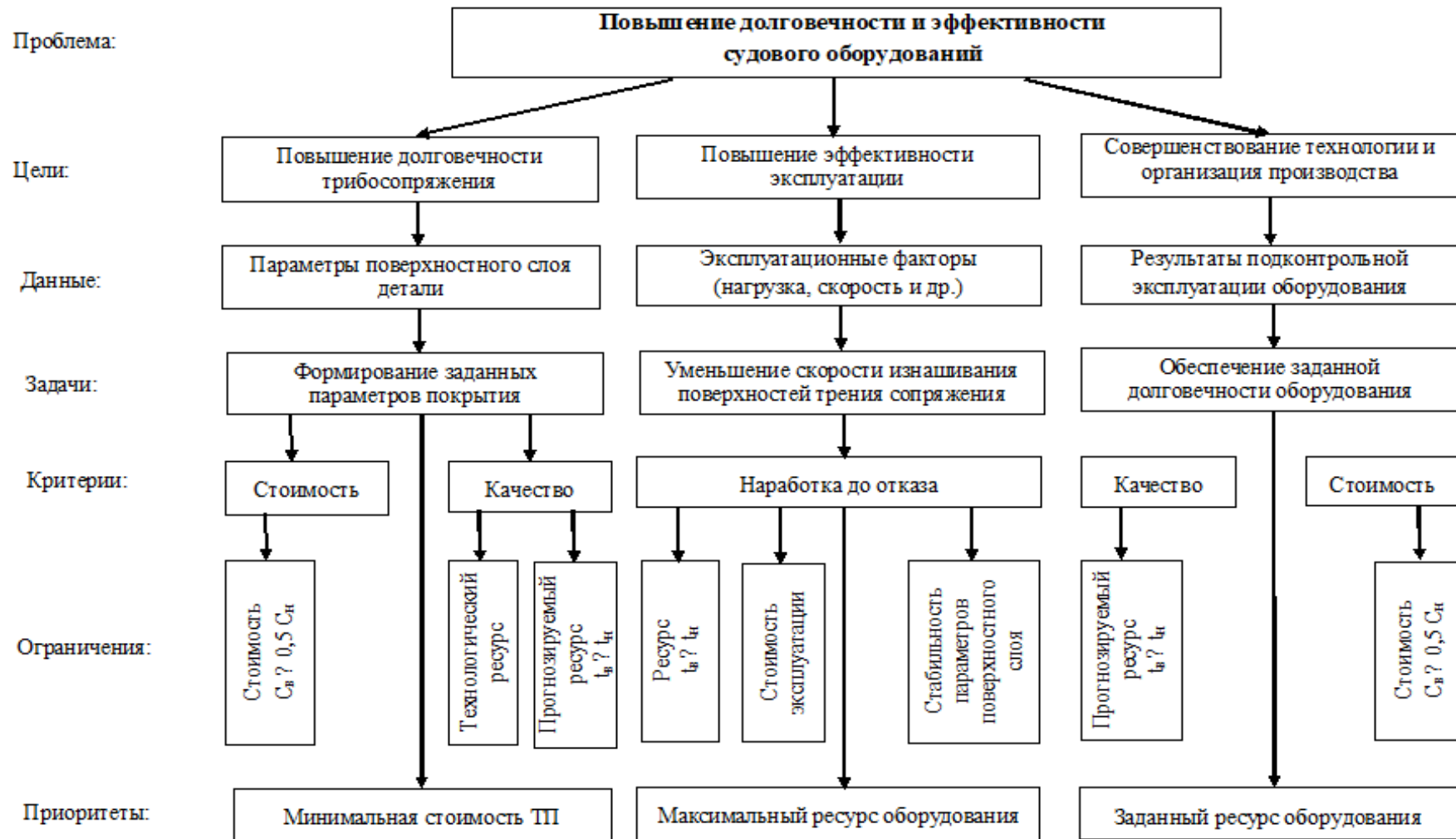


Рис. 3. Структура этапов, целей и задач, решаемых при конструктивно-технологическом обеспечении долговечности триботехнических узлов судовых дизелей

Следует отметить, что выпускаемое судовое оборудование постоянно модернизируется в целях увеличения его мощности, производительности, снижения массы и габаритов, в результате чего возрастают механические и тепловые нагрузки на поверхности деталей, снижается их ресурс. Поэтому для обеспечения требуемой долговечности трибоузла при проектировании технологического процесса формирования покрытия приходится применять или разрабатывать новые материалы, в наибольшей степени удовлетворяющие условиям эксплуатации, осваивать и внедрять перспективные методы нанесения покрытий или поверхностного упрочнения.

Эксплуатационные, или служебные, свойства трибоузла проявляются в процессе работы оборудования, которые можно оценить коэффициентом трения, износостойкостью, нагрузкой схватывания и т.д.

Уровень разработанной технологии оценивается стоимостью, технологичностью продукции и прогнозируемым ресурсом восстановленной детали.

В целом задачи, решаемые при разработке технологического процесса (рис. 3), имеют ограничения, которые учитывают требования, предъявляемые со стороны как технологии, так и эксплуатации. Конструктивно-технологическое обеспечение долговечности триботехнических узлов судовых дизелей – это весьма сложная система с многоуровневой иерархической структурой. На каждом уровне системы устанавливаются критерии эффективности функционирования и решаются задачи оптимизации

Интересы эксплуатации учитываются посредством технологического обеспечения назначенного ресурса, который может быть достигнут за счет применения при восстановлении или упрочнении современных технологии и материалов, обеспечивающих получение более высоких эксплуатационных свойств детали посредством увеличения триботехнических, механических и тому подобных свойств поверхностного слоя и других характеристик детали или отдельных ее элементов. При этом восстановленная деталь не должна увеличивать величину эксплуатационных расходов на оборудование, в которое она входит.

Исходя из целей, стоящих перед системой конструктивно-технологического обеспечения заданной долговечности триботехнических узлов судового оборудования путем формирования износостойкого покрытия на поверхностях трения деталей (рис. 4), особенностей ее функционирования, взаимозависимости и взаимодействия физико-механических и триботехнических свойств, а также условий работы и влияния их на долговечность трибосопряжения, учета таких принципов декомпозиции общей задачи, как получение необходимых промежуточных результатов и возможности реализации общего оптимума через совокупность локальных оптимумов, сформулирован следующий комплекс оптимизационных задач: оптимизация физико-механических и триботехнических свойств покрытия; обоснование условий работы факторов КТФПП и ЭФП, оптимизация параметров режима формирования покрытия, оптимизация показателей долговечности.

После анализа эксплуатационных факторов, действующих на поверхность детали, и определения доминирующего вида изнашивания выбирается способ формирования покрытия (методы нанесения покрытия, последующей механической обработки или упрочнения и т.п.) и материала. Важным условием оптимального выбора способа формирования износостойких и антифрикционных покрытий является определение факторов, существенно влияющих на износостойкость материалов поверхностных слоев сопряженных деталей. Интенсивность изнашивания деталей зависит как от технологии формирования покрытия, обеспечивающей необходимые эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали при трении, так и от условий ее работы.

Выбор перспективного технологического метода и присадочного материала для формирования покрытия обеспечивает новое состояние объекта обработки в некотором диапазоне его геометрических, точностных, качественных и других характеристик.

Опыт разработки технологических процессов восстановления показывает, что следует существенно дополнить перечень функций по уровням проектирования благодаря включению в него выбора материала и метода формирования покрытия, оптимизации технологических параметров нанесения покрытия и режимов упрочняющей или механической обработки, технологического нормирования и др.

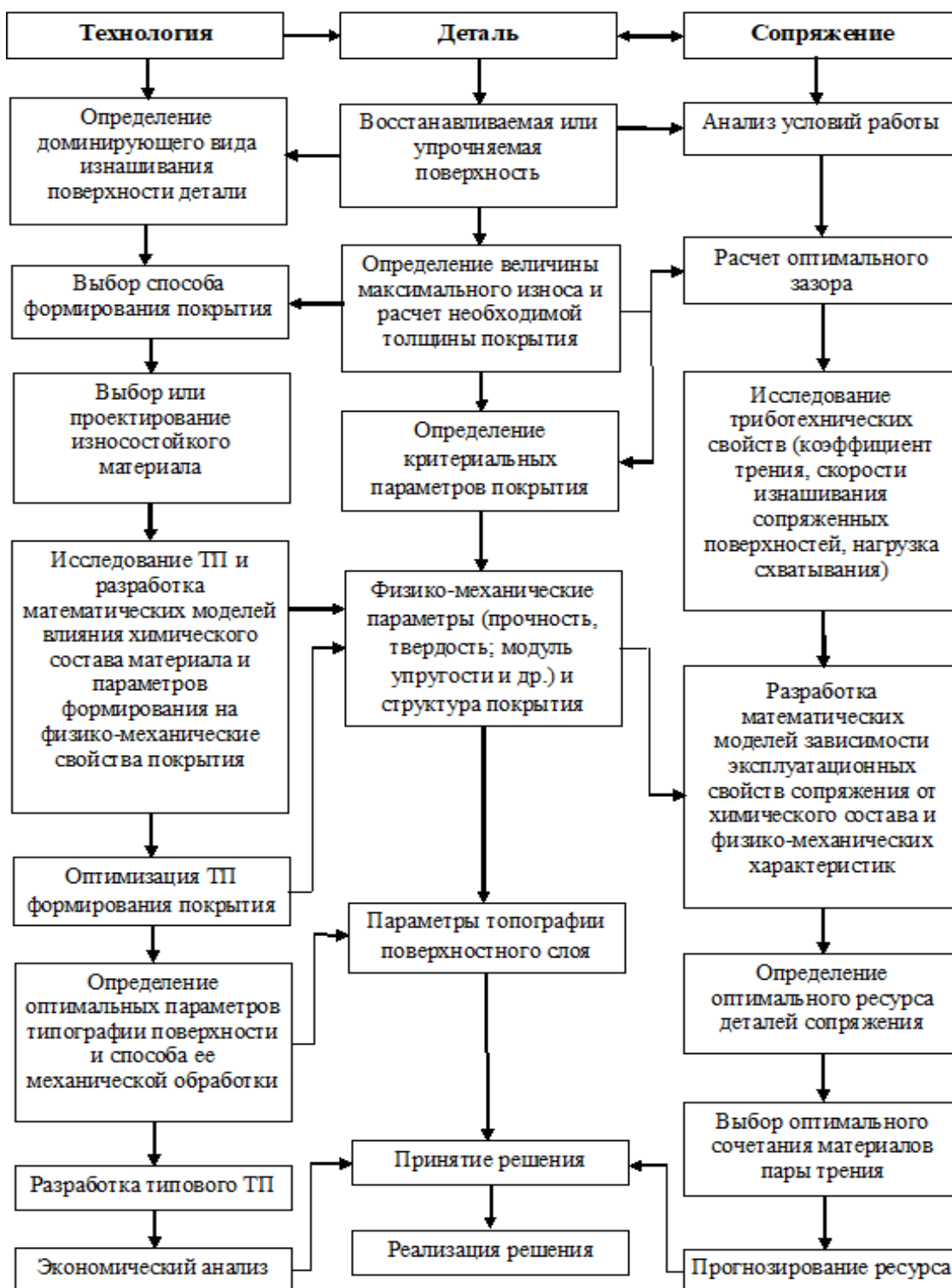


Рис. 4. Блок-схема конструктивно-технологического обеспечения заданной долговечности узлов трения путем формирования износостойкого покрытия

Наиболее трудоемким этапом разработки технологического процесса является определение параметров режима, которые позволяют получить оптимальные свойства поверхностного слоя детали при формировании покрытий. Следует отметить, что в настоящее время практически отсутствует методология разработки и выбора критериальных параметров поверхностного слоя деталей сопряжения и оптимальных параметров режима формирования покрытий вследствие воздействия на параметры поверхностного слоя детали различных эксплуатационных факторов и разнообразных физико-химических явлений.

Сложность описания таких воздействий определяется тем, что сам процесс формирования относится к разряду многофакторных. Для некоторых экспериментальных данных трудно установить корреляционную связь между входными и выходными параметрами, а многие из полученных аналитических уравнений носят нелинейный и трансцендентный характер. Это ведет, в свою очередь, к тому, что целевая функция эксплуатационных параметров не поддается в общем случае аналитическому описанию.

Задача выбора режимов формирования свойств материала для деталей значительно усложняется, когда имеется несколько параметров оптимизации, определяющих работоспособность и долговечность всей системы (например, изно- и коррозионная стойкость, жаропрочность и т.д.), то есть необходимо выполнить многокритериальную оптимизацию. Эта сложность проявляется еще и в том, что многие параметры оказывают влияние на долговечность не только сами, но и в комбинации с другими параметрами оптимизации. Поэтому необходим главный или обобщающий критерий оптимизации, по которому можно было бы однозначно оценивать правильность выбора оптимальной области параметров режима формирования свойств материала на стадии проектирования технологического процесса. Долговечность большинства деталей судового оборудования определяется их износостойкостью, поэтому в качестве обобщающего или главного параметра оптимизации можно выбрать показатели износостойкости детали, определяющие ресурс сопряжения или суммарную скорость изнашивания деталей трибоузла, так как они зависят от химического состава, физико-механических и структурных свойств поверхностного слоя, которые, в свою очередь, зависят от набора входных технологических параметров технологического процесса формирования покрытия (состава присадочного материала, способа формирования покрытия и т.д.). Для обеспечения требуемой износостойкости необходимо определить степень влияния химического состава, основных физико-механических и структурных свойств поверхностного слоя на данные отклики. Для этого необходимо построить многоуровневую модель, у которой обобщающий параметр будет функцией откликов, то есть

$$Z = f(y_1, y_2, \dots, y_n), \quad (1)$$

где $y_1 = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$; $y_2 = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$; ... $y_n = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – отклики (физико-механические и структурные свойства поверхностного слоя), зависящие от набора входных технологических параметров процесса.

Для получения таких зависимостей более всего подходит методика регрессионного анализа, позволяющая получать зависимости как линейного, так и показательного (экспоненциального) типа. Например, износостойкость напыленных материалов зависит от коэффициента трения, нагрузки схватывания, адгезионной и когезионной прочности покрытия, которые, в свою очередь, являются функциями технологических параметров напыления. Таким образом, имея зависимости (1) и $y_1 = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$; $y_2 = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$; ... $y_n = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, можно управлять процессом формирования свойств поверхности таким образом, чтобы обеспечить требуемую долговечность (износостойкость) трибоузла.

Заключительным этапом перед принятием решения о реализации разработки являются экономический анализ разработанной технологии и определение прогнозируемого ресурса детали и узла в целом. Экономический анализ осуществляют на основе себестоимости продукции, произведенной по разработанной технологии. Прогнозирование ресурса трибосопряжения в первом приближении выполняется на основе сравнительных лабораторных или стендовых испытаний старого и нового технологических решений. Ресурс натуральных трибоузлов, поступающих на восстановление или упрочнение, известен. Зная скорости изнашивания деталей трибоузлов старого и нового технологических решений при лабораторных испытаниях, легко определить прогнозируемый ресурс восстановленной или упрочненной детали и, соответственно, трибосопряжения в целом.

Критериями при оценке разработанной технологии являются ее стоимость и получаемое качество детали (прогнозируемый ресурс).

Важным моментом при разработке технологического процесса является выбор базы: наиболее корректной базой следует считать поверхность детали, которая не подверглась изнашиванию при эксплуатации и не подлежит механической обработке в процессе восстановления.

Выводы

Таким образом, разработанная концепция конструктивно-технологического обеспечения долговечности триботехнических узлов судового оборудования, основанная на системном подходе, предлагает алгоритм решения проблемы и позволяет разрабатывать технологические процессы формирования покрытий, обеспечивающие заданный ресурс сопряжения при приемлемой экономической эффективности.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Авдеевский В.С., Броневец М.А., Буше Н.А. Трибология и триботехника // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1996. № 4. С. 3–13.
2. Березовский Б.А., Барышников Ю.М., Борзенко В.И., Кемпнер Л.М. Многокритериальная оптимизация: Математические аспекты. Москва: Наука, 1989. 128 с.
3. Дроздов Ю.Н. Преодоление трибологического барьера –проблема повышения ресурса технических систем // Вестник машиностроения. 1996. № 11. С. 3–7.
4. Замятин Ю.П., Замятина Л.А., Замятин А.Ю. Разработка научных основ и инженерных методов обеспечения надежности транспортных триботехнических систем // Трение и износ. 1996. Т. 17, № 2. С. 255–258.
5. Леонтьев Л.Б. Технологическое обеспечение надежности судового оборудования. Владивосток: Морской государственный университет, 2009. 544 с.
6. Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л. Системное проектирование технологического процесса формирования износостойких покрытий // Металлообработка. 2012. № 1(67). С. 44–49.
7. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. Москва: Физматлит, 2007. 368 с.
8. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Дудко П.П. Повышение надежности трибосопряжений. Санкт-Петербург: Академия транспорта РФ, 2001. 303 с.
9. Погодаев Л.И., Кузьмин А.А. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. Санкт-Петербург: Академия транспорта РФ, 2006. 608 с.
10. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 октября 2019 г. № 2553-р.

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/59-68>

Leontyev L., Leontyev A.

LEV B. LEONTYEV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, leontyev.l.b@yandex.ru,<http://orcid.org/0000-0002-8072-306X>*Far Eastern Federal University*ANDREY L. LEONTYEV, Candidate of Engineering Sciences, Minister of Energy and Gas Supply, gfi25leontev@mail.ru*Government of the Primorsky Territory*

Vladivostok, Russia

The concept of constructive and technological support durability of tribological units of ship equipment

Abstract. The aging of marine vessels and the difficulty in acquiring replacement parts for equipment makes the problem of restoring worn parts and increasing their durability economically feasible and very relevant. The main causes of part failures in most cases are various types of wear of friction surfaces. However, the lack of advanced technological processes for the restoration of worn parts and the methodology for their development in the system "technology - wear-resistant coating - operating conditions" to ensure their specified durability do not allow ensuring the efficiency of the equipment. To achieve the durability of tribological components of ship equipment, we have developed a methodology for designing technological processes based on a systematic approach, which offers an algorithm for solving the problem and allows us to develop technological processes for the formation of coatings that provide a given resource with acceptable economic efficiency.

Keywords: durability, technological process, restoration, hardening, tribological component, ship equipment, system approach

For citation: Leontyev L., Leontyev A. The concept of constructive and technological support durability of tribological units of ship equipment. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):59–68. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Avduevskii V.S., Bronovets M.A., Bushe N.A. Tribology and tribotechnics. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 1996;(4):3–13. (In Russ.).
2. Berezovskii B.A., Baryshnikov Yu.M., Borzenko V.I., Kempner L.M. Multiobjective optimization: Mathematical aspects. Moscow, Nauka, 1989. 128 p. (In Russ.).
3. Drozdov Yu.N. Overcoming the tribological barrier – the problem of using technical systems. *Vestnik mashinostroeniya*. 1996;(11):3–7. (In Russ.).
4. Zamyatin Yu.P., Zamyatina L.A., Zamyatin A.Yu. Development of scientific bases and engineering methods of reliability of high reliability of tribological systems. *Trenie i iznos*. 1996;17(2):255–258. (In Russ.).
5. Leont'ev L.B. Technological support of ship equipment reliability. Vladivostok, Nevelskoy MSU, 2009. 544 p. (In Russ.).
6. Leont'ev L.B., Leont'ev A.L. System design of the technological process for the formation of wear-resistant coatings. *Metalloobrabotka*. 2012;(67):44–49. (In Russ.).
7. Myshkin N.K., Petrokovets M.I. Friction, lubrication, wear. Physical foundations and technical applications of tribology. Moscow, Fizmatlish, 2007. 368 p. (In Russ.).
8. Pogodaev L.I., Kuz'min V.N., Dudko P.P. Increasing the reliability of tribocouples. St. Petersburg, Akademiya transporta RF, 2001. 303 p. (In Russ.).
9. Pogodaev L.I., Kuz'min A.A. Structural and energy models of metals and machine parts. St. Petersburg, Akademiya transporta RF, 2006. 608 p. (In Russ.).
10. Strategy for the development of the shipbuilding industry for the period up to 2035. Approved by the Federal District of the Russian Federation dated October 28, 2019. № 2553-р. (In Russ.).

Судовые энергетические установки

Научная статья

УДК 621.791.14:62-97

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/69-74>

В.Н. Стаценко, Р.Х. Садыков, И.А. Гончарова, М.В. Бернавская

СТАЦЕНКО ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор, vladsta@mail.ru

САДЫКОВ РУСЛАН ХАНАФЬЕВИЧ – старший преподаватель, sadykov_rh@bk.ru

ГОНЧАРОВА ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА – магистрант, goncharovairina027@gmail.ru

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

БЕРНАВСКАЯ МАЙЯ ВЛАДИМИРОВНА – доцент, bernavskaya@mail.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Санкт-Петербург, Россия

Обобщение исследований пленочной жидкостной нейтрализации токсичных газовых выбросов

Аннотация. В процессе очистки загрязненных газовых выбросов организовано пленочное течение жидкости по вертикальным пластинам. При их движении между пластинами пленка жидкости как абсорбент интенсивно поглощает газообразные и твердые загрязняющие вещества. Задача настоящей работы – экспериментальное исследование и критериальное обобщение интенсивности абсорбции углекислого газа в пленку жидкости при разных ее расходах, скоростях воздуха, концентрации газа. Анализ результатов экспериментов показал, что оптимальная скорость воздуха составляет 0,8–1 м/с, оптимальное значение орошения равно $(3,3–3,8) \cdot 10^{-4}$ м²/с. При этом концентрацию двуокиси углерода можно снизить на 30–45 % на длине контакта 0,8–1 м. Обобщение полученных результатов в широком диапазоне изменения концентраций газа, расходов жидкости и скорости движения загрязненного газа произведено в виде зависимости между диффузионными критериями Нуссельта и Пекле. Эта зависимость позволяет рассчитать габаритные характеристики жидкостных пленочных массообменных аппаратов. В дальнейших работах будут проводиться исследования абсорбции в пленку жидкости окисей углерода и азота, а также двуокиси серы.

Ключевые слова: газовые выбросы, жидкостная нейтрализация, пленка, жидкость, абсорбция, экспериментальный стенд, двуокись углерода, снижение концентрации, обобщение, критерии

Для цитирования: Стаценко В.Н., Садыков Р.Х., Гончарова И.А., Бернавская М.В. Обобщение исследований пленочной жидкостной нейтрализации токсичных газовых выбросов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 69–74.

Введение

Жидкостные пленочные массообменные аппараты широко используются в химической технологии в качестве абсорберов газообразных сред в жидкость, нисходящее движение которой организуется внутри вертикальных труб или на плоской вертикальной поверхности [1, 4]. Такие аппараты можно использовать и для очистки технологических уходящих газов, выделяемых, например, при сжигании органического топлива или в ходе проведения различных сварочных операций [3, 5].

Для выполнения расчетов процессов абсорбции при различных условиях необходимо знать величины коэффициентов массоотдачи между газом и пленкой жидкости β_T . При массопередаче между газом и жидкостью возникают сопротивления газовой и жидкой фаз. Доля

каждого из фазовых сопротивлений определяется растворимостью газов. Для хорошо растворимых газов (при константе фазового равновесия $m < 1$) доля сопротивления жидкой фазы невелика. Для очень малых m таким сопротивлением пренебрегают. К этим газам можно отнести NH_3 , HCl , SO_2 .

Для плохо растворимых газов (CO_2 , CO , NO) основное сопротивление массопередаче сосредоточено в жидкой фазе. Для них константа равновесия $m > 100$. Тогда сопротивлением газовой фазы можно пренебречь.

Для умеренно растворимых газов ($m = 1-100$) сопротивления каждой из фаз соизмеримы, и пренебрегать ими нельзя.

При массоотдаче между абсорбируемым газом и пленкой большое значение имеют физико-химические свойства жидкости и может происходить процесс хемосорбции [7]. При поглощении, в частности, оксида углерода CO_2 раствором карбоната натрия происходит химическая реакция, часть CO_2 переходит в связанное состояние с образованием нерастворимого осадка, и концентрация растворенной окиси углерода понижается, соответственно абсорбционная способность раствора повышается. Скорость химической реакции между CO_2 и раствором карбоната натрия имеет относительно низкие значения, поэтому можно считать, что основное сопротивление массопереносу для оксида углерода сосредоточено в жидкой фазе.

Для описания процессов в пленочных теплообменных аппаратах обычно используются критериальные уравнения. Каждое из них применимо для определенных условий организации рабочего процесса, конструктивных особенностей аппаратов и т.д. При этом большинство результатов обобщается критериальным уравнением

$$Nu_D = A \cdot 0.1 Re_\Gamma^m Re_{пл}^n Pr_D^p \cdot P/P_\Gamma. \quad (1)$$

Здесь $Nu_D = \beta \cdot l / D$ – критерий Нуссельта, диффузионный; $Re_{пл} = \Gamma_V / \nu_B$ – критерий Рейнольдса, пленочный; $Pr_D = \nu_\Gamma / D$ – критерий Прандтля, диффузионный; β – коэффициент массоотдачи, м/с; D – коэффициент диффузии, м²/с; l – определяющий размер, м; $\Gamma_V = G_{пл} / \Pi$ – орошение пластины пленкой жидкости, м²/с; $G_{пл}$ – расход пленки воды, м³/с; Π – смоченный периметр рабочего канала, м; ν_Γ , ν_B – кинематические вязкости воздуха и воды, м²/с; P_Γ , P – давление газа в ядре потока и у поверхности жидкости.

Константы A , m , n , p имеют значительные расхождения, особенно при малых $Re_{пл}$. Это объясняется тем, что исследователи работали в узких диапазонах изменения $Re_{пл}$ и применяли различные условия эксперимента.

Цель настоящей статьи – обобщить в критериальной форме результаты исследования интенсивности снижения концентрации двуокиси углерода в установке жидкостной пленочной нейтрализации.

Описание технического решения

В нашей работе для очистки воздуха от газовых выбросов и аэрозолей предлагается использование жидкостного пленочного нейтрализатора [2, 8]. Эта установка представляет собой закрытый корпус с вертикально установленными пластинами, в верхней части которых закреплены пленкообразующие устройства; с их помощью жидкость растекается по обеим сторонам пластин в виде пленки. Загрязненный газ поступает в корпус снизу через входной патрубок и движется вверх между пластинами. Благодаря большой площади контакта пленка жидкости как абсорбент интенсивно поглощает газообразные и твердые загрязняющие вещества и, стекая вниз по пластинам, удаляется из корпуса фильтра. Жидкость после очистки и нейтрализации может подаваться на пленкообразующие устройства для повторного использования. Нейтрализаторы такого типа обладают существенным достоинством – низким гидравлическим сопротивлением и малым брызго- и влагуносом, что является важным фактором для очистки выхлопных газов двигателей.

Для изучения рабочих процессов, происходящих в жидкостном пленочном нейтрализаторе, проведены исследования на экспериментальном стенде, основным элементом которого

являлись латунные пластины длиной 1100 и 600 мм [8]. Они жестко закреплены в корпусе с патрубками входа загрязненного и выхода очищенного воздуха. Подача воды на латунную пластину осуществляется через пленкообразующее устройство, пленка воды движется вниз по поверхности рабочей пластины, очищаемый воздух движется вверх, при их контакте происходят процессы абсорбции газов в пленку жидкости и осаждение твердых частиц на поверхности пленки. Для измерения скорости воздуха используется трубка Прандтля с U-образным жидкостным манометром, расход жидкости определяется объемным способом и контролируется по жидкостному манометру.

Основной задачей исследований является определение зависимости изменения концентрации различных газовых и аэрозольных загрязнений по длине рабочей пластины. В настоящей работе в качестве газового загрязнения используется двуокись углерода CO_2 , начальная концентрация задавалась в диапазоне $C_0=1,2-4,5$ %.

Результаты измерений изменения концентрации двуокиси углерода CO_2 по длине контакта в воде при скорости воздуха $V_{воз} = 0,5-1$ м/с представлены на рис. 1. В качестве характеристик процесса абсорбции использовались критерии $Re_{г}$ (газовый) и $Re_{пл}$ (пленочный):

$$Re_{г} = V_{воз} \cdot d_{экр} / \nu_{г}, \tag{2}$$

$$Re_{пл} = \Gamma_{в} / \nu_{в}, \tag{3}$$

где $d_{экр} = \sqrt{4S/\pi}$ – эквивалентный диаметр, м; S – площадь сечения рабочего канала, м².

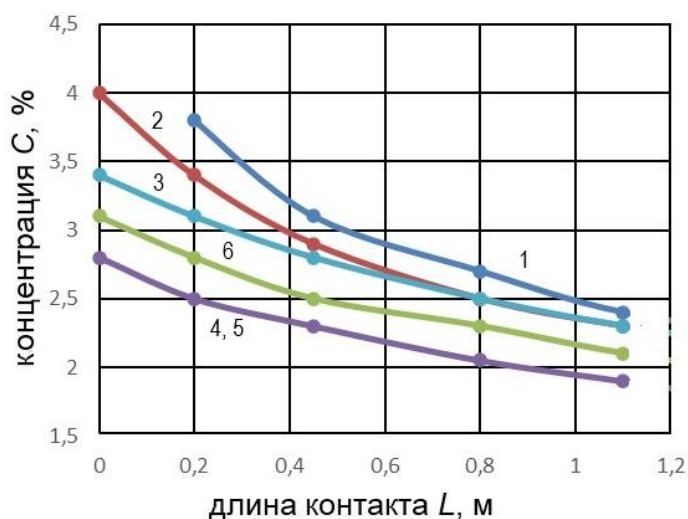


Рис. 1. Изменение концентрации CO_2 по длине контакта; $t_f=17^\circ C$; $Re_{г} = 20-10^3$; 1 – $Re_{пл} = 110$; 2 – 230; $Re_{г} = 31-10^3$; 3 – $Re_{пл} = 76$; 4 – 45; 5 – 28; $t_f=120^\circ C$; 6 – $Re_{г} = 19 \cdot 10^3$; $Re_{пл} = 76$

При исследованиях абсорбции углекислого газа получены следующие результаты.

1. Зависимость снижения концентрации газа по длине рабочей пластины имеет экспоненциальный характер. Наиболее значительное изменение концентрации происходит на начальном рабочем участке.

2. Интенсивность изменения концентрации газа по длине значительно зависит от начальной его концентрации. Чем выше начальная концентрация, тем значительнее ее изменение.

3. При использовании воды в качестве абсорбирующей среды оптимальная скорость воздуха составляет $V_{воз}=0,8-1$ м/с, оптимальное значение орошения – $\Gamma_{в}=(3,3-3,8) \cdot 10^{-4}$ м²/с. При этом концентрация газа CO_2 снижается на 30–45%.

Результаты обобщения

Обобщение результатов исследований абсорбции двуокиси углерода CO_2 в пленку жидкости произведено в системе безразмерных критериев, предложенных в [6]:

$$Nu_D \approx Pe_D. \tag{4}$$

Здесь $Nu_D = g_\Gamma \cdot \delta / (\rho \cdot D \cdot \Delta C)$ – критерий Нуссельта, диффузионный; $Pe_D = Re_{пл} \cdot Pr_D (\delta/L)$ – критерий Пекле, диффузионный; $g_\Gamma = G_{аб}/S_{аб}$ – удельный поток абсорбированного газа, кг/(м²·с); $S_{аб} = \Pi \cdot \Delta L$ – площадь абсорбции, м²; ΔL – участок канала, м; ΔC – концентрационный напор (движущая сила абсорбции), кг/м³; ρ – плотность газа, кг/м³; δ – толщина пленки, м; L – длина контакта, м. Остальные составляющие критериев Nu_D и Pe_D представлены в описании уравнения (1).

В расчетах критерия Pe_D использованы экспериментальные и справочные данные. При расчете критерия Nu_D поток абсорбированного газа $G_{аб}$ (кг/с) на каждом участке рабочего канала ΔL находится по измеренным значениям его концентрации в потоке воздуха перед C_{i-1}^r и за участком C_i^r (кг/м³):

$$G_{аб} = V_{воз} S_{сеч} (C_{i-1}^r - C_i^r). \tag{5}$$

Здесь $S_{сеч} = \Pi \cdot h$ – площадь сечения воздушного канала, м²; $V_{воз}$ – скорость воздуха в рабочем канале, м/с; h – высота сечения, м; Π – смоченный периметр рабочего канала, м.

Концентрация абсорбированного газа в пленке воды на каждом участке C_i^b , (кг/м³) и концентрационный напор ΔC (кг/м³) рассчитываются по следующим зависимостям:

$$C_i^b = C_{i-1}^b + \frac{G_{аб}}{G_{плm}}, \tag{6}$$

$$\Delta C = C_i^r - C_i^b. \tag{7}$$

Здесь C_{i-1}^b – концентрация газа в пленке перед участком рабочего канала, кг/кг; C_i^r , C_i^b – средние на участке ΔL значения концентраций газа в воздухе и пленке, кг/кг; $G_{плm} = G_{пл} \cdot \rho$ – массовый расход пленки воды, кг/с.

Результаты обработки наших данных по абсорбции углекислого газа CO_2 в пленке пресной воды, полученные в широком диапазоне изменения критериев Re_Γ , $Re_{пл}$, представлены на рис. 2. По этим данным получено критериальное уравнение:

$$Nu_D = 1,57 Pe_D^{0,64}. \tag{8}$$

Наши экспериментальные данные обобщаются этими уравнениями с погрешностью $\pm 25\%$.

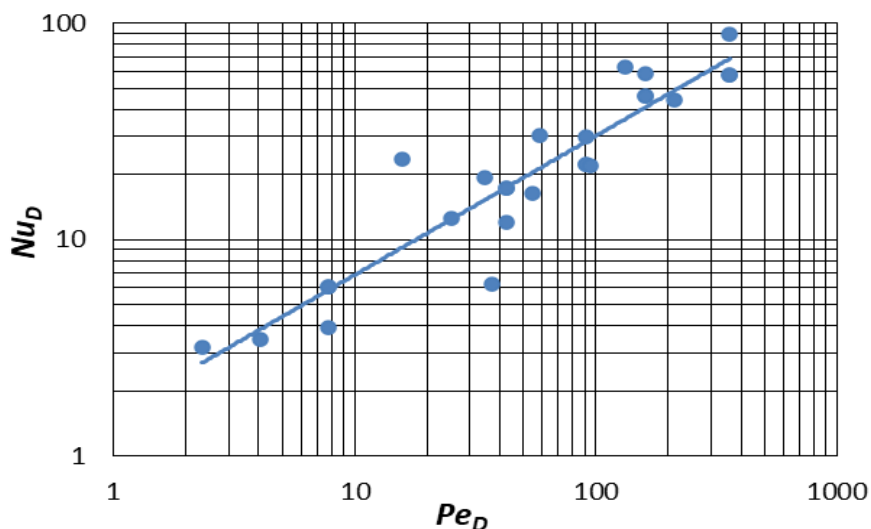


Рис. 2. Обработка экспериментальных данных по абсорбции CO_2 в безразмерных координатах

Полученная критериальная зависимость по абсорбции углекислого газа в пленку воды позволяет рассчитать локальные значения коэффициентов массоотдачи и абсорбции газа в пленку жидкости по длине контакта и, соответственно, габаритные характеристики жидкостных пленочных массообменных аппаратов в широком диапазоне изменения концентраций газа, расходов жидкости и скорости движения загрязненного воздуха или газа.

Заключение

В результате анализа процесса абсорбции двуокиси углерода CO_2 в пленочном жидкостном аппарате можно сделать вывод, что при использовании воды в качестве абсорбирующей среды оптимальная скорость воздуха составляет $V_{воз} = 0,8-1$ м/с, оптимальное значение орошения равно $G_v = (3,3-3,8) \cdot 10^{-4}$ м²/с, при этом концентрация газа CO_2 снижается на 30–45 %.

Этот метод может использоваться для очистки технологических выбросов, а также выхлопных газов от различных энергетических установок, в которых обычно содержатся те же токсичные газообразные компоненты и твердые частицы. Жидкостные нейтрализаторы являются обязательной составляющей систем нейтрализации отработанных газов для специальных подземных установок с дизелями, для дизельных погрузочно-транспортных машин и специального самоходного оборудования, которые работают во взрывоопасной среде (шахтах, рудниках и др.). Системы жидкостной нейтрализации применяются также для судовых дизельных установок, где в качестве рабочей жидкости используется забортная вода.

Основной задачей будущих исследований является определение изменения концентрации таких токсичных составляющих выхлопных газов, как CO , SO_2 и NO_x , а также аэрозольных загрязнений от длины контакта при жидкостной пленочной нейтрализации. Результаты этих исследований будут обобщаться в виде критериальных зависимостей.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абсорбция газовых примесей. URL: <https://msd.com.ua/processy-inzhenernoj-zashhity-okruzhayushhej-sredy/?ysclid=1669mlsz4965855379> (дата обращения: 09.08.2022).
2. Бернавская М.В., Стаценко В.Н. Комплексное решение проблемы экологической безопасности автономных гидротехнических сооружений. Дистанционные методы, технические средства и алгоритмы в прикладных задачах исследования природных сред // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 12. С. 3–12.
3. Вострикова М.А. Анализ эффективности работы систем очистки дымовых газов морских судов от примесей при использовании абсорберов и скрубберов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 66–69.
4. Генералов М.Б., Александров В.П., Алексеев В.В. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Москва: Машиностроение, 2004. 832 с.
5. Гришагин В.М. Сварочный аэрозоль: образование, исследование, локализация, применение. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 213 с.
6. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. О совместном тепломассопереносе при пленочной абсорбции // Теплообмен и гидродинамика при кипении и конденсации. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1979. С. 278–284.
7. Старкова А.В., Махоткин А.Ф., Балыбердин А.С., Махоткин И.А. Механизм и кинетика хемосорбции углекислого газа водным раствором карбоната натрия // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 15. С. 76–81.
8. Стаценко В.Н., Еременко М.А., Бернавская М.В. Метод жидкостной пленочной нейтрализации токсичных газовых выбросов // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2020. № 2(43). С. 88–95.

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/69-74>

Statsenko V., Sadykov R., Goncharova I., Bernavskaya M.

VLADIMIR N. STATSENKO, Doctor Engineering Science, Professor, vladsta@mail.ru

RUSLAN H. SADYKOV, Senior Lecturer, sadykov_rh@bk.ru

IRINA A. GONCHAROVA, Master Student, goncharovairina027@gmail.ru

Department Industrial Safety, Polytechnical Institute

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

MAYA V. BERNAVSKAYA, Associate Professor, bernavskaya@mail.ru

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

St. Petersburg, Russia

Studies of film liquid neutralization of toxic gas emissions generalization

Abstract. In the process of cleaning polluted gas emissions, a film flow of liquid along vertical plates is organized. When they move between the plates, the liquid film as an absorbent intensively absorbs gaseous and solid pollutants. The objective of this work is an experimental study and criterion generalization of the intensity of carbon dioxide absorption into a liquid film at different flow rates, air velocities, and gas concentrations. Analysis of the experimental results showed that the optimal air velocity is 0.8–1 m/s, the optimal irrigation value is $(3.3–3.8) \cdot 10^{-4}$ m²/s. In this case, the concentration of carbon dioxide can be reduced by 30–45% at a contact length of 0.8–1 m. The generalization of the results obtained in a wide range of changes in gas concentrations, liquid flow rates, and the rate of movement of polluted gas is made in the form of a relationship between the Nusselt and Peclet diffusion criteria. This dependence makes it possible to calculate the overall characteristics of liquid film mass transfer apparatuses. In further work, studies will be carried out on the absorption of carbon and nitrogen oxides, as well as sulfur dioxide, into the liquid film.

Keywords: gas emissions, liquid neutralization, film, liquid, absorption, experimental stand, carbon dioxide, concentration reduction, generalization, criteria

For citation: Statsenko V., Sadykov R., Goncharova I., Bernavskaya M. Studies of film liquid neutralization of toxic gas emissions generalization. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):69–74. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Absorption of gas impurities. URL: <https://msd.com.ua/processy-inzhenernoj-zashhity-okruzhayushhej-sredy/?ysclid=1669mlsz4965855379> – 09.08.2022. (In Russ.).
2. Bernavskaya M.V., Statsenko V.N. A comprehensive solution to the environmental safety problem of autonomous hydraulic structures. Remote methods, technical tools and algorithms in applied problems of environmental research. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). Separate articles (special issue)*. 2014;(12):3–12. (In Russ.).
3. Vostrikova M.A. Analysis of the efficiency of flue gas cleaning systems of vessels from impurities when using absorbers and scrubbers. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2015;(4):66–69. (In Russ.).
4. Generalov M.B., Alexandrov V.P., Alekseev V.V. Machines, and apparatus for chemical and petrochemical industries. Moscow, Mashinostroenye, 2004. 832 p. (In Russ.).
5. Grishagin V.M. Welding aerosol: education, research, localization, application: monograph. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2011. 213 p. (In Russ.).
6. Nakoryakov V.E., Grigorieva N.I. On joint heat and mass transfer during film absorption. *Heat transfer and hydrodynamics during boiling and condensation*. Novosibirsk, ITF SO AN USSR, 1979. P. 278–284. (In Russ.).
7. Starkova A.V., Makhotkin A.F., Balyberdin A.S., Makhotkin I.A. Mechanism and kinetics of carbon dioxide chemisorption by an aqueous solution of sodium carbonate. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2011;(15):76–81. (In Russ.).
8. Statsenko V.N., Eremenko M.A., Bernavskaya M.V. Method of liquid film neutralization of toxic gas emissions. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2020;(2):88–95. (In Russ.).

Судовые энергетические установки

Научная статья

УДК 629.12

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/75-84>

М.Н. Покусаев, К.О. Сибярев, М.М. Горбачев, А.Д. Ибадуллаев

ПОКУСАЕВ МИХАИЛ НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой,
evt2006@rambler.ru

СИБРЯЕВ КОНСТАНТИН ОЛЕГОВИЧ – к.т.н., доцент, доцент кафедры, evt2006@rambler.ru

ГОРБАЧЕВ МАКСИМ МИХАЙЛОВИЧ – к.т.н., доцент кафедры, max9999_9@mail.ru

ИБАДУЛЛАЕВ АДЕЛЬ ДАМИРОВИЧ – ассистент, adel.ibadullaev99@mail.ru

Кафедра «Эксплуатация водного транспорта»

Астраханский государственный технический университет

Астрахань, Россия

Методика выбора пружинного демпфера крутильных колебаний судового дизеля

Аннотация. В статье рассматривается расчетная методика выбора модели пружинного демпфера крутильных колебаний для судового дизеля. В качестве практического применения методики в статье приводятся результаты расчетной оценки выбора демпфера крутильных колебаний модели Geislinger D60/14/2 для дизелей Wartsila 6L20, которые являются главными двигателями судов популярных серий RST, RSD и др. Дополнительно проведен расчетный анализ изменения характеристик демпфера при изменении его жесткости, что позволит количественно оценить риски развития крутильных колебаний в судовых дизелях при деградации пружин демпфера.

Ключевые слова: крутильные колебания, пружинный демпфер, судовой машинно-двигательный комплекс, судовая энергетическая установка, судового дизель

Для цитирования: Покусаев М.Н., Сибярев К.О., Горбачев М.М., Ибадуллаев А.Д. Методика выбора пружинного демпфера крутильных колебаний судового дизеля // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 75–84.

Введение

Пружинные демпферы широко распространены в современных судовых машинно-двигательных комплексах (МДК) и установлены на дизелях фирм «Wartsila», «CAT», «МАК», «MAN» и др. Сочетание в конструкции демпфера пружинной части и гидравлического наполнителя в виде смазочного масла позволяет осуществлять эффективное снижение крутильных колебаний в широком диапазоне частот. Общий вид и конструкция демпферов крутильных колебаний фирмы «Geislinger» (Австрия) с рессорными пружинами представлены на рис. 1.

Целью статьи является разработка методики выбора пружинного демпфера крутильных колебаний и определение его эффективных характеристик для судового дизеля на базе анализа ранее проведенных исследований. Здесь мы, не претендуя на авторство разработанной методики, предлагаем четко обозначить ее стадии и этапы, поскольку единой поэтапной методики выбора пружинных демпферов для судовых дизелей в отечественных источниках не обнаружено. Это одна из проблем, которая будет сказываться на развитии отечественного производства пружинных демпферов; в настоящее время практически все пружинные демпферы для судовых дизелей изготавливаются за рубежом. Дополнительно в нашем исследовании поставлена задача провести расчетную оценку выбора пружинного демпфера «Geislinger» D60/14/2 (с точки зрения эффективности снижения крутильных колебаний) для судового дизеля Wartsila 6L20.

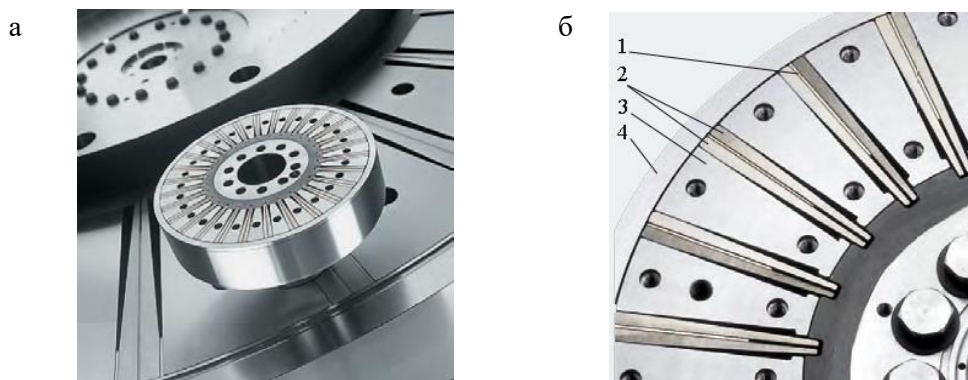


Рис. 1. Пружинный демпфер крутильных колебаний «Geislinger» [9]: а – общий вид, б – конструкция; 1 – промежуточная вставка между рессорными пружинами, 2 – рессорные пружины, 3 – сектор маховой массы, 4 – внешний обод (корпус) демпфера

Исследование и его результаты

Предлагаемая нами методика выбора и расчета параметров пружинного демпфера судового дизеля содержит несколько этапов и базируется на рекомендациях фирмы-производителя демпферов «Geislinger» (Австрия) [9], исследованиях Дж. П. Ден-Гартога (США) [2], Л.В. Ефремова (Россия) [3], К.Е. Hafner (Германия) [11], Jaehoon Jee (Ю. Корея) [13] и др.

Этап 1. Определение момента инерции внешней части демпфера

Согласно рекомендациям производителя демпферов «Geislinger» [9], в первую очередь необходимо выбрать пружинный демпфер с моментом инерции внешней части I_s (имеется в виду суммарный момент инерции маховых масс) к суммарному моменту инерции дизеля $I_{диз}$ в следующей пропорции:

- для 2-тактных дизелей $I_s =$ от 5 до 25% от $I_{диз}$;
- для 4-тактных дизелей $I_s =$ от 10 до 50% от $I_{диз}$.

Это обосновывается специалистами фирмы «Geislinger» [9] необходимостью сохранения небольших конструктивных размеров демпфера, что влияет на его массо-габаритные показатели и стоимость.

Этап 2. Определение жесткости демпфера

Для дальнейшего расчета необходимо знать частоту собственных колебаний дизеля, на которую первоначально настраивается демпфер, чаще всего для МДК это частота одноузловой формы колебаний системы «дизель–маховик», что отвечает правилам РМРС [7] и рекомендациям фирмы «Geislinger» [9]. При помощи общепризнанных методов расчета – цепных дробей В.П. Терских [8], матричных [4] или методом Хольцера [12] – определяется частота свободных колебаний. В большинстве МДК частота собственных колебаний демпфера должна быть меньше частоты собственных колебаний дизеля. Формула (1) дает возможность провести первое приближение для определения жесткости демпфера C_D с достаточной точностью:

$$C_D < \omega^2 \cdot I_s, \tag{1}$$

где C_D – жесткость демпфера на кручение, Н·м/рад;
 ω – круговая частота собственных колебаний дизеля, рад/с;
 I_s – момент инерции внешней части демпфера, кг·м².

При отсутствии данных о пружинной жесткости демпфера от производителя возможно использование методики, предложенной в работе Л.В. Ефремова [3] и основанной на использовании конструктивных размеров демпфера.

В первую очередь производится расчет податливости демпфера $E_{демп(расч)}$, рад/(Н·м):

$$E_{демп(расч)} = \frac{6 \cdot l^2}{m \cdot E_{мат} \cdot n \cdot b \cdot h_{ср}^3 \cdot (R+1)}, \tag{2}$$

где l – длина пластин, м;
 m – число пружинных пакетов, шт.;
 $E_{\text{мат}}$ – модуль упругости материала пружинных пластин, МПа;
 n – число пружин в пружинных пакетах, шт.;
 b – ширина пластин, м;
 $h_{\text{ср}}$ – средняя толщина пластин, м;
 R – расстояние от центра демпфера до крепления пластин во внутреннем кольце (звездочке), м.

Формула для расчета жесткости демпфера соответственно $C_{D(\text{расч})}$, Н·м/рад:

$$C_{D(\text{расч})} = 1/E_{\text{демпп(расч)}}. \quad (3)$$

Проведенные авторами расчеты по формулам (2), (3) показали, что расчетная величина жесткости для демпфера «Geislinger» D60/14/2 составляет $1,43 \cdot 10^6$ Н·м/рад при заводской жесткости $1,4 \cdot 10^6$ Н·м/рад, то есть отличие составляет не более 2%.

Анализ формул (2, 3) показывает, что при износе пружины ее толщина h будет уменьшаться (принимаясь равномерный износ) и, соответственно, податливость демпфера $E_{\text{демпп(расч)}}$ будет увеличиваться, а жесткость демпфера C_D будет уменьшаться.

Этап 3. Определение требуемого давления подачи масла в демпфер

При необходимом демпфирующем моменте T_d (Н·м) абсолютное давление подачи масла p (кг/см²) в демпфер определяется по формуле из технической документации фирмы «Geislinger» [9]:

$$p = \frac{T_d}{T_{dp}}, \quad (4)$$

где T_d – демпфирующий момент, Н·м;

T_{dp} – относительная величина демпфирующего момента на 1 бар давления масла, Н·м/бар.

Этап 4. Определение допустимой тепловой нагрузки демпфера

В качестве завершающего этапа необходимо рассчитать тепловую нагрузку в демпфере P_{kw} (кВт) для одного гармонического порядка и алгебраически сложить значения для всех порядков. Согласно каталогу на пружинные демпферы «Geislinger» [9] общая тепловая нагрузка не должна превышать пределов, указанных в технических характеристиках демпфера.

Тепловая нагрузка в демпфере P_{kw} (кВт) для одного гармонического порядка рассчитывается по формуле

$$P_{kw} = 5,2 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{k_d}{1+k_d^2} \cdot \frac{T^2 \cdot i \cdot n}{C_D}, \quad (5)$$

где p – абсолютное давление подачи масла, бар;

k_d – безразмерный коэффициент демпфирования;

T – общий вибрационный момент в демпфере, Н·м;

i – порядок гармоника колебаний;

n – частота вращения дизеля, мин⁻¹;

C_D – жесткость демпфера, Н·м/рад.

Практическое применение методики

Практическое применение разработанной методики проведено авторами на 4-тактном дизеле Wartsila 6L20, с номинальной мощностью 1200 кВт, при частоте вращения 1000 мин⁻¹. Дизели Wartsila 6L20 устанавливаются в качестве главных двигателей на судах новых проектов, например RST27, RST27M типа «ВФ Танкер», «Балт Флот» (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид судна типа «ВФ Танкер» проекта RST27 [1]

Элементы крутильной схемы дизеля Wartsila 6L20 имеют суммарный момент инерции (не включая демпфер) $I_{\text{диз}} = 123,61 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Тогда, согласно данным фирмы «Geislinger», рекомендуемый диапазон момента инерции внешней части I_s пружинного демпфера составляет ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$):

- минимальный момент инерции $I_{s\text{min}} = 0,1 \cdot I_{\text{диз}} = 0,1 \cdot 123,61 = 12,36$;
- максимальный момент инерции $I_{s\text{max}} = 0,5 \cdot I_{\text{диз}} = 0,5 \cdot 123,61 = 61,68$.

Согласно каталогу фирмы «Geislinger» [9] подобным условиям могут соответствовать демпферы модельного ряда D63–D90. Следует отметить, что в реальных дизелях Wartsila 6L20 устанавливаются демпферы «Geislinger» D60/14/2 диаметром 600 мм, моментом инерции внешней части $I_s = 7,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и моментом инерции внутренней части $I_{\text{ин}} = 0,373 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Это говорит о том, что указанный диапазон моментов инерции является именно рекомендуемым и может быть скорректирован с учетом конструктивных параметров реальной модельной линейки демпферов.

Далее необходимо провести расчет свободных колебаний дизеля Wartsila 6L20. Момент инерции одного колена коленчатого вала (принятый за основной в системе) составляет $3,646 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, податливость одного колена коленчатого вала (принятая за основную в системе) – $4,27 \cdot 10^{-8} \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$.

Крутильная схема дизеля Wartsila 6L20 (без демпфера) и результаты расчета одноузловой формы свободных колебаний приведены на рис. 3.



Рис. 3. Результаты расчета свободных колебаний дизеля Wartsila 6L20 без демпфера

Согласно проведенному расчету, частота свободных колебаний представленной выше крутильной схемы составляет 6217 кол/мин, или для круговой частоты – 650,7 рад/с. Рабочий диапазон частоты вращения коленчатого вала дизеля Wartsila 6L20 – от 400 до 1100 об/мин. Моторной форме крутильных колебаний соответствуют следующие частоты, входящие в рабочий диапазон дизеля: 6-й порядок – 1036 мин^{-1} ; 9-й порядок – 691 мин^{-1} ; 12-й порядок – 518 мин^{-1} .

Для демпфера «Geislinger» D60/14/2 крутильная жесткость составляет $C_D = 1,4 \cdot 10^6$ Н·м/рад. Проведем оценку выбора демпфера по данному критерию.

Согласно формуле (1) C_D должно быть менее величины $C_{Dрек}$:

$$C_{Dрек} = \omega^2 \cdot I_s = 650,7^2 \cdot 7,1 = 3 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}.$$

Полученный результат показывает, что условие $C_D < C_{Dрек}$ выполняется.

Для оценки эффективности работы выбранного демпфера необходимо построить его амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Построение АЧХ пружинного демпфера производится на основании методики, разработанной Дж.П. Ден-Гартогом [2], уточненной Л.В. Ефремовым [3] и дополненной фирмой «Geislinger» [9]. Несмотря на то, что основная часть методики была представлена в труде Дж.П. Ден-Гартога в середине прошлого века, ее с успехом используют и сейчас, например, в труде Л.В. Ефремова [3], в каталоге демпферов «Geislinger» [9], в статье Jaehoon Jee [13] и других исследованиях. Методика основана на теории пружинного виброгасителя (динамического поглотителя колебаний Фрама) (рис. 4).

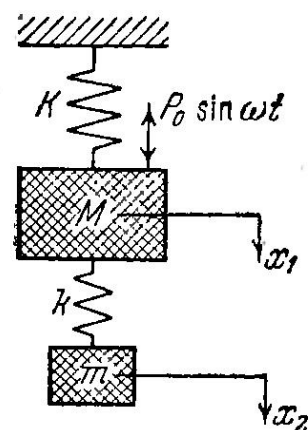


Рис. 4. Расчетная схема динамического поглотителя колебаний Фрама

Если применить данную расчетную схему к системе «дизель Wartsila 6L20–пружинный демпфер Geislinger D60/14/2», то для обозначений на рис. 4 будут соответствовать:

$M = I_{сд}$ – суммарный момент инерции дизеля и внутренней части демпфера = $I_s + I_{in} = 123,361 + 0,373 = 123,734 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;

$K = C_{сэКВ}$ – эквивалентная жесткость основной системы – дизеля = $23,41 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$;

$m = I_s = 7,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент инерции внешней части демпфера;

$k = C_D = 1,4 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$ – жесткость демпфера;

x_1 – угол поворота основной системы (за него может быть принят угол поворота внутренней массы демпфера), град.;

x_2 – угол поворота внешней массы демпфера, град.;

P_0 – внешняя возмущающая сила, кг.

Если в качестве возмущающей силы принять силу, возникающую от давления газов в дизеле, то P_0 (кг) будет определяться по формуле

$$P_0 = \frac{(p_r - p_0) \cdot S \cdot 10^6}{9,81}, \quad (6)$$

где $p_r = 3 \text{ МПа}$, избыточное давление газов;

$p_0 = 0,103 \text{ МПа}$, атмосферное давление;

S – площадь поперечного сечения цилиндра, м^2 , вычисляется по формуле

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (7)$$

где $D = 0,2 \text{ м}$ – диаметр цилиндра, м,

$S = 3,14 \cdot 0,2^2 / 4 = 0,0314 \text{ м}^2$;

$P_0 = (3 - 0,103) \cdot 0,0314 \cdot 10^6 / 9,81 = 9272,8 \text{ кг}$.

Собственные частоты системы «демпфер–дизель» двухузловой формы ω_1 и одноузловой формы ω_2 вычисляются по формулам:

$$\omega_{c1} = \frac{\omega_1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(1 + \mu) \cdot f^2 + 1 - \sqrt{(\mu \cdot f^2 + (1 - f)^2) \cdot (\mu \cdot f^2 + (1 + f)^2)}}, \quad (8)$$

$$\omega_{c2} = \frac{\omega_1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(1 + \mu) \cdot f^2 + 1 + \sqrt{(\mu \cdot f^2 + (1 - f)^2) \cdot (\mu \cdot f^2 + (1 + f)^2)}}, \quad (9)$$

где ω_1 – частота колебаний системы, которая определяется по формуле

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad (10)$$

ω_2 – частота колебаний демпфера, которая определяется по формуле

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (11)$$

μ – отношение моментов инерции внешней части демпфера к моменту инерции основной системы (суммарному моменту инерции дизеля) определяется по формуле

$$\mu = m/M. \quad (12)$$

Для проведения расчета необходимо также рассчитать дополнительные параметры.

Параметр f – отношение собственной частоты колебаний демпфера к собственной частоте колебаний основной системы (дизеля), определяется по формуле

$$f = \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (13)$$

Статическая амплитуда колебаний $x_{ст}$ определяется по формуле

$$x_{ст} = \frac{P_0}{K}. \quad (14)$$

Коэффициент критического затухания колебаний C_k определяется по формуле

$$C_k = 2 \cdot m \cdot \omega_1. \quad (15)$$

Для описания работы демпфера с учетом затухания колебаний используется выражение, позволяющее определить амплитуду колебаний основной системы x_1 :

$$x_1 = P_0 \cdot \sqrt{\frac{(k - m \cdot \omega^2)^2 + C^2 \cdot \omega^2}{((M \cdot \omega^2 - K) \cdot (m \cdot \omega^2 - k) - k \cdot m \cdot \omega)^2 + C^2 \cdot \omega^2 \cdot (M \cdot \omega^2 + m \cdot \omega^2 - K)^2}}, \quad (16)$$

где C – коэффициент затухания;

ω – частота вынужденных колебаний.

Для построения характеристик демпфирования коэффициент затухания C может изменяться от 0 до ∞ , частота вынужденных колебаний ω также будет изменяемой величиной.

Особенностью работы пружинного демпфера является наличие двух точек P и Q , через которые проходят все графики АЧХ с разными коэффициентами затухания от $C = 0$ до $C = \infty$.

При построении характеристики конкретного пружинного демпфера коэффициент затухания C приравнивается к оптимальному коэффициенту затухания C_0 (при $f = 1$) в точке P , который может быть вычислен по формуле

$$C_0 = C_k \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot (\mu + 3) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\mu}{\mu + 2}}\right)}{8 \cdot (1 + \mu)}}. \quad (17)$$

Средняя величина коэффициента затухания C_{QP} для точек Q и P может быть определена по формуле

$$C_{QP} = C_k \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \mu}{8 \cdot (1 + \mu)^3}}. \quad (18)$$

Частоты, определяющие положение точек Q и P , могут быть определены как корни степенного уравнения:

$$g^4 - 2 \cdot g^2 \cdot \left(\frac{1+f^2+\mu \cdot f^2}{2+\mu} \right) + \frac{2 \cdot f^2}{2+\mu} = 0, \quad (19)$$

где g – отношение частоты вынужденных колебаний ω к частоте собственных колебаний основной системы ω_1 :

$$g = \frac{\omega}{\omega_1}. \quad (20)$$

Построение АЧХ демпфера производится в координатах по оси абсцисс – отношение частот ω/ω_1 , а по оси ординат – отношение амплитуд колебаний $x_1/x_{ст}$.

Результаты построения АЧХ демпфера «Geislinger» D60/14/2 при его установке на дизеле Wartsila 6L20 на основе приведенных выше исходных данных для расчета представлены на рис. 5.

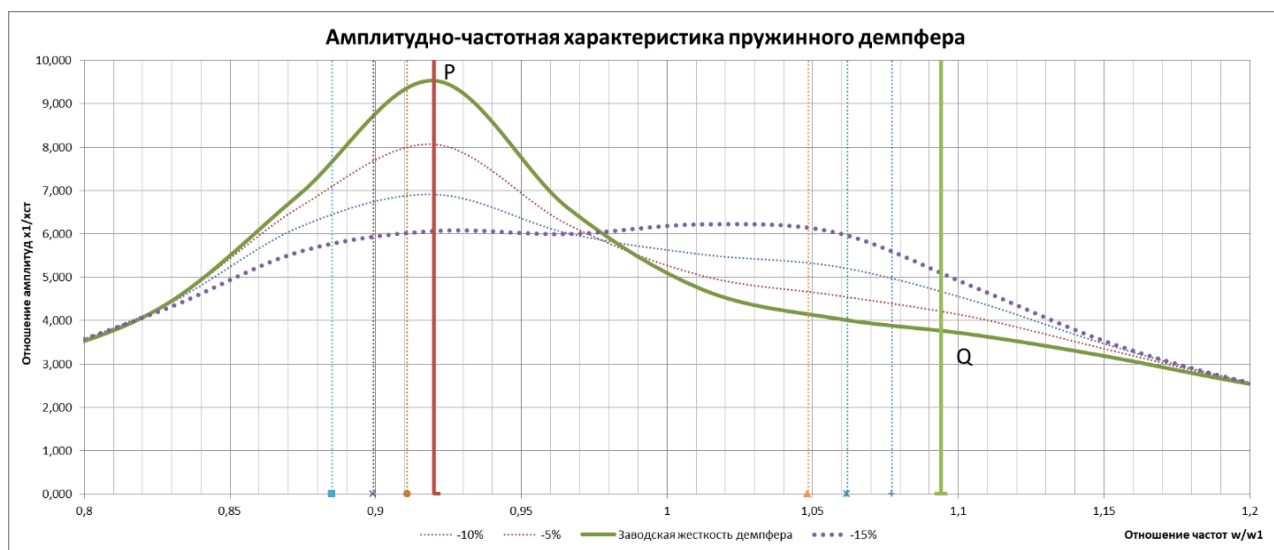


Рис. 5. Зависимость АЧХ пружинного демпфера «Geislinger» D60/14/2 от жесткости

Для наглядности мы не приводим на рис. 5 графики с коэффициентами затухания $C = 0$ и $C = \infty$, а только АЧХ с изменяемой жесткостью демпфера C_D : $1,19 \cdot 10^6$ Н·м/рад (–15% от номинальной жесткости); $1,26 \cdot 10^6$ Н·м/рад (–10% от номинальной жесткости); $1,33 \cdot 10^6$ Н·м/рад (–5% от номинальной жесткости); $1,4 \cdot 10^6$ Н·м/рад (заводская настройка жесткости).

В заключение анализа выбора демпфера «Geislinger» D60/14/2 для дизеля Wartsila 6L20 необходимо привести величину требуемого давления масла $p = 4$ кг/см² и допустимую величину тепловой нагрузки (тепловой мощности) $P_{kw} = 7,5$ кВт (согласно технической документации фирмы-производителя демпфера).

Обсуждение

Из результатов расчета следует, что жесткость $1,4 \cdot 10^6$ Н·м/рад (номинальная), которая соответствует заводской настройке демпфера «Geislinger» D60/14/2, не является оптимальной для дизеля Wartsila 6L20, а полученная расчетная жесткость $1,19 \cdot 10^6$ Н·м/рад (на 15% меньше заводской жесткости) дает необходимую ровную плоскую характеристику АЧХ и снижение максимального отношения амплитуд $x_1/x_{ст}$ с 9,532 до 6,065 (на 36%).

Отметим, что данная проблема характерна и для других судовых дизелей. Например, в работе Jaehoon Jee, Chongmin Kim and Yanggon Kim (специалистов «Mokpo National Maritime University» и «Korean Register») [13] представлен аналогичный анализ оптимальности выбора пружинного демпфера D330/EU для судового малооборотного дизеля MAN 6G70ME-C с номинальной мощностью 16590 кВт и частотой вращения коленчатого вала 77,1 мин⁻¹.

Расчетный анализ также был проведен при помощи методики расчета параметров пружинного виброгасителя, представленной в работе Дж. П. Ден-Гартога [2]. Установлено, что

при снижении жесткости с $10 \cdot 10^6$ Н·м/рад (которая соответствует реально установленному демпферу) до $7,16 \cdot 10^6$ Н·м/рад (на 28,4% меньше) АЧХ демпфера D330/EU становится наиболее ровной, а отношение $x_1/x_{ст}$ снижается с 14,3 до 5,7 (почти на 60%). Это обеспечивает наибольшую эффективность пружинного демпфера при крутильных колебаниях, возникающих в судовом дизеле 6G70ME-C.

Контроль технического состояния пружинного демпфера при его эксплуатации производится по рекомендации фирм-производителей через каждые 10000–12000 часов посредством его частичной разборки и замера зазоров между пружинами для оценки степени их износа. Также готовится техническое решение в виде систем мониторинга [5, 10], позволяющих контролировать амплитуды крутильных колебаний и динамику их изменения, а при их росте сигнализировать о наступлении аварийной ситуации, в том числе и по причине деградации демпфера.

Заключение

По итогам проведенного исследования можно сделать ряд выводов.

1. Предложенная методика выбора пружинного демпфера позволяет определить наиболее эффективную по характеристикам модель демпфера для судового дизеля. Однако в связи с отличием модельных рядов демпферов друг от друга часто выбирается наиболее близкий по критериям демпфер, что дает некоторое отличие от идеальной АЧХ.

2. Расчет показывает, что даже небольшое изменение крутильной жесткости пружинного демпфера (на 15%) приводит к существенному изменению коэффициента динамического усиления амплитуды колебаний – до 36%.

3. Изменение крутильной жесткости демпфера может происходить при износе или повреждении пружин в процессе его эксплуатации, что может фактически являться базой для разработки методики безразборной оценки технического состояния пружинных демпферов по результатам торсиографирования [6]. Для разработки данной методики необходимо выявить количественную закономерность изменения касательных напряжений в элементах судового МДК или изменения амплитуд крутильных колебаний в зависимости от изменения толщины пружин демпфера.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ВФ Танкер-17. URL: <https://fleetphoto.ru/photo/292588/?vid=29665> (дата обращения: 01.11.2022).
2. Ден-Гартог Дж.П. Механические колебания. Москва: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1960. 577 с.
3. Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. Санкт-Петербург: Наука, 2007. 276 с.
4. Лашко В.А. Матричные методы в расчетах крутильных колебаний силовых установок с ДВС. Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 2003. 213 с.
5. Покусаев М.Н., Сибряев К.О., Горбачев М.М. Проектирование и разработка системы мониторинга крутильных колебаний судовых машинно-двигательных комплексов // 65-я Междунар. науч. конф. Астраханского гос. техн. ун-та: материалы конф. Астрахань, 2021. С. 819–821.
6. Покусаев М.Н., Сибряев К.О., Горбачев М.М., Ибадуллаев А.Д. Работоспособность механических демпферов крутильных колебаний судовых двигателей внутреннего сгорания // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 1. С. 35–41.
7. Российский морской регистр судоходства. Приложения к руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. НД №2-030101-009. СПб., 2020. 409 с.
8. Терских В.П. Крутильные колебания валопровода силовых установок. В 4 т. Ленинград: Судостроение, 1977.

9. Geislinger. Damper Catalog. Version 15.9, 2020. 50 p.
10. Geislinger Monitoring System. Catalog, 2013. 27 p.
11. Hafner K.E, Maass H. Torsionsschwingungen in der Verbrennungs-kraftmaschine. New York, 1985. 434 p.
12. Holzer H. Die Berechnung der Drehschwingungen und ihre Anwendung im Maschinenbau. Berlin, 1921. 207 s. (In Germ.).
13. Jaehoon J., Jungmin K., Yanggong K. Improving the design of a visco-spring damper for controlling torsional vibrations in a propulsion shaft system with the problem of engine acceleration. *Journal of Marine Science and Technology*. 2020;8:428.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 4/53

Ship power plants

www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/75-84>

Pokusaev M., Sibryaev K., Gorbachev M., Ibadullaev A.

MIKHAIL N. POKUSAEV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department, evt2006@rambler.ru

KONSTANIN O. SIBRYAEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, evt2006@rambler.ru

MAXIM M. GORBACHEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, max9999_9@mail.ru

ADEL D. IBADULLAEV, Assistant, adel.ibadullaev99@mail.ru

Operation of Water Transport Department

Astrakhan State Technical University

Astrakhan, Russia

Methodology of choosing a torsional vibration spring damper for marine diesel engine

Abstract. The article considers the calculation method of choosing a model of a spring damper of torsional vibrations for a marine diesel engine. As a practical application of the methodology, the article presents the results of a calculated evaluation of the choice of a torsional vibration damper of the Geislinger D60/14/2 model for Wartsila 6L20 diesels, which are the main engines of ships of the popular RST, RSD and others series. Additionally, the authors carried out a computational analysis of the change in the characteristics of the damper when its stiffness changes, which will allow to quantify the risks of torsional oscillations in marine diesel engines during degradation of the damper springs.

Keywords: torsional vibrations, spring damper, marine engine and propulsion system, marine power plant, marine diesel

For citation: Pokusaev M., Sibryaev K., Gorbachev M., Ibadullaev A. Methodology of choosing a torsional vibration spring damper for marine diesel engine. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):75–84. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Tanker VF-17. URL: <https://fleetphoto.ru/photo/292588/?vid=29665> – 01.11.2022. (In Russ.).
2. Den-Gartog J.P. Mechanical vibrations. Moscow, State Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 1960. 577 p. (In Russ.).
3. Efremov L.V. Theory and practice of research of torsional vibrations of power plants using computer technologies. St. Petersburg, Nauka, 2007. 276 p. (In Russ.).
4. Lashko V.A. Matrix methods in calculations of torsional vibrations of power plants with internal combustion engines. Study guide. Khabarovsk, Publishing House of KHSTU, 2003. 213 p. (In Russ.).

5. Pokusaev M.N., Sibryaev K.O., Gorbachev M.M. Design and development of a system for monitoring torsional vibrations of marine propulsion systems. *65th Int. Sci. Conf. of Astrakhan State Tech. University. Conf. Proc.* Astrakhan, 2021. P. 819–821. (In Russ.).
6. Pokusaev M.N., Sibryaev K.O., Gorbachev M.M., Ibadullaev A.D. Operability of mechanical dampers of torsional vibrations of marine internal combustion engines. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology.* 2022;(1):35–41. (In Russ.).
7. Russian Maritime Register of Shipping. Appendices to the manual on technical supervision of vessels in operation. ND No.2-030101-009, SP-b, 2020. 409 p. (In Russ.).
8. Terskikh V.P. Torsional vibrations of the shaft line of power plants. In 4 vol. Leningrad, Shipbuilding, 1977. (In Russ.).
9. Geislinger. Catalog of dampers. Version 15.9, 2020. 50 p.
10. Geislinger monitoring system. Catalog, 2013. 27 p.
11. Hafner K.E., Maass H. Torsional vibrations in an internal combustion engine. New York, 1985. 434 p.
12. Holzer H. Calculation of torsional vibrations and their application in mechanical engineering. Berlin, 1921. 207 s.
13. Jaehoon J., Jungmin K., Yanggong K. Improving the design of a visco-spring damper for controlling torsional vibrations in a propulsion shaft system with the problem of engine acceleration. *Journal of Marine Science and Technology.* 2020;8:428.

Судовые энергетические установки

Научная статья

УДК 67.014

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/85-95>

Е.В. Мазур, П.С. Щербань, В.С. Мазур

МАЗУР ЕКАТЕРИНА ВЛАДИМИРОВНА – ассистент, преподаватель, EVMazur@kantiana.ruЩЕРБАНЬ ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ – к.т.н., доцент, ursa-maior@yandex.ru

Высшая школа междисциплинарных исследований и инжиниринга

МАЗУР ВАЛЕРИЯ СЕРГЕЕВНА – аспирант, vmazur@kantiana.ru

Высшая школа компьютерных наук и прикладной математики

ОНК «Институт высоких технологий»

Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта

Калининград, Россия

Исследование рабочих характеристик моторного масла судового двигателя с применением матрицы параметров процесса

Аннотация. В настоящем исследовании разработан метод, позволяющий увеличить срок службы механизмов и повысить надежность судового оборудования в условиях эксплуатации. Эффект достигается путем обнаружения наиболее весомых и влиятельных параметров используемого моторного масла, установления по каждому из них граничных значений и определения степени отклонения фактических показателей параметра от граничных. Обработка массива физико-химических данных по маслам с учетом наработки оборудования на отказ осуществляется компьютерной программой, разрабатываемой для мониторинга состояния судового двигателя в режиме эксплуатации. Проектируемый программный комплекс позволяет осуществлять более точное и своевременное техническое обслуживание судовой энергетической установки.

Ключевые слова: матрица параметров процесса, моторное масло, судовый двигатель, износ подшипников, анализы масел

Для цитирования: Мазур Е.В., Щербань П.С., Мазур В.С. Исследование рабочих характеристик моторного масла судового двигателя с применением матрицы параметров процесса // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 85–95.

Введение

Процесс деградации работающих технических систем и их элементов непрерывен и неизбежен, что обусловлено, в частности, термодинамическими законами. Вместе с тем замедлить износ можно, оказывая системное воздействие на составляющие процесса, разрушающие механизмы. Анализ данных факторов может стать основой для выбора действий по корректировке процесса технического обслуживания двигателя, в процессе принятия решений по предупреждающим мерам, проектировании конструкций и в целом при оценке надежности оборудования. Эти положения распространяются и на моторные масла, используемые в судовых двигателях. Так, предлагаемый производителями временной интервал по замене моторного масла несет рекомендательный характер, основанный на статистических данных общего масштаба и проведенных в лабораторных условиях испытаниях. В то же время реально существующий остаточный ресурс масла может в значительной мере скорректировать время и средства, затрачиваемые службой старшего механика на техническое обслуживание системы

В системе «двигатель–масло» особый интерес представляют любые изменения в характеристиках взаимосвязанных элементов, а также в случайных процессах, протекающих в них и между ними [10, 18]. Качество используемого масла непостоянно и, как следствие, изменяется и значение временного фактора относительно показателей надежности двигателя. Уровень деградации масла в системе выражается «выпадением» за границы нормы рабочих параметров, описывающих характеристики смазочного материала (рис. 1).

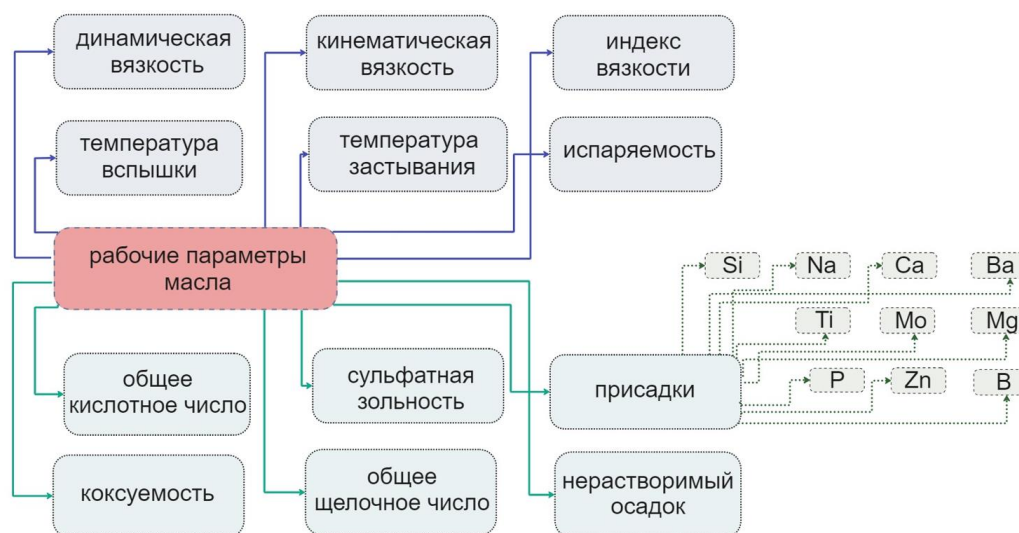


Рис. 1. Основные параметры моторных масел

В процессе оценки тех или иных параметров необходимо понимать функции, которые выполняет каждая из представленных характеристик, а также уровни допустимости каждого значения [11, 13, 14]. При работе в высоких температурных диапазонах и при высоких интервальных нагрузках скорость окисления масла увеличивается, что приводит к образованию твердых абразивных частиц, контакт которых с элементами системы двигателя приводит к появлению частиц износа. Из этого следует, что уровень загрязняющих масло элементов и вязкость - основные показатели качества смазывающего материала.

Техническая диагностика – основное мероприятие, направленное на обнаружение информации о состоянии механизмов, машин, узлов, элементов и механической системы в целом. Методы, предложенные для получения и обработки данных, основанные на применении математического аппарата, способствуют составлению алгоритмов принятия решений [1]. Надежность в ходе эксплуатации двигателей морских судов должна быть обеспечена оперативностью и квалифицированностью действий по техническому обслуживанию, в то время как тип и частота действий по обеспечению работоспособности механизмов напрямую зависят от знаний технического состояния элементов эксплуатируемых механизмов [19]. Принятие соответствующего решения – вопрос сложный и, как правило, представляет собой сочетание прошлого опыта, метода экспертных оценок и своевременной диагностики, основанной на результатах анализа физико-химических параметров масла [8, 16].

Анализ матрицы параметров процесса (МПП) [12], основанный на системной обработке данных физико-химических показателей масла, позволит поддержать принятие решения по техническому обслуживанию судового двигателя и тем самым повысить надежность при эксплуатации технической системы.

Материалы и методы

Формированием четкого понимания технического состояния системы «двигатель–масло» могут служить результаты анализов и точное прогнозирование, основанное на поверочных расчетах [9, 17]. Создание современных способов и схем решения вопроса надежности строится на разработке и внедрении интеллектуальных программ, учитывающих накопленный

опыт и индивидуальный подход к технической структуре [15]. Простота разработки программного продукта на языке Python и возможность дополнять и совершенствовать библиотеку программы предоставляют возможность создания баз данных причин и последствий отказов.

Разрабатываемая интеллектуальная программа для оценки состояния системы «двигатель–масло» позволяет анализировать введенные статистические данные по физико-химическому составу работающего масла, сравнивать их со значениями контролируемых параметров, с их граничными показателями, что дает возможность в дальнейшем получить информацию о причинах возникновения и развития неисправностей (рис. 2).

При обработке анализов методом МПП в данной работе были использованы результаты лабораторных исследований масла эксплуатируемого судового дизельного двигателя. Данные были обработаны программным комплексом с помощью языка программирования Python.

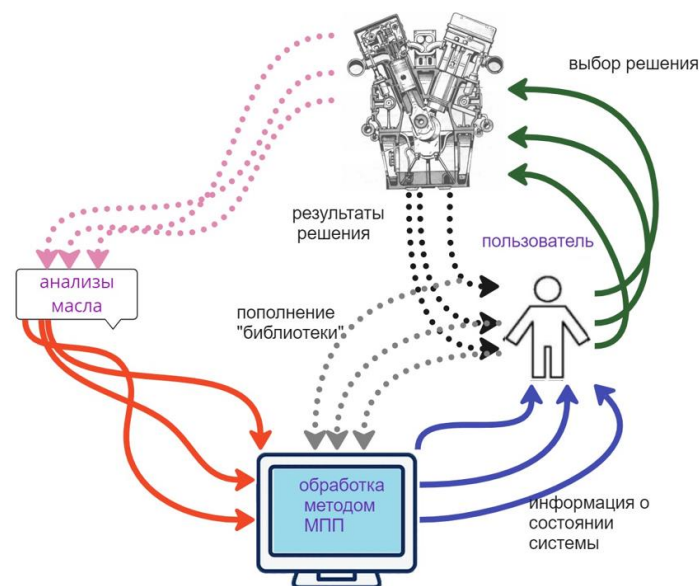


Рис. 2. Концепция работы эргатической системы с применением программного обеспечения, основанного на методе МПП

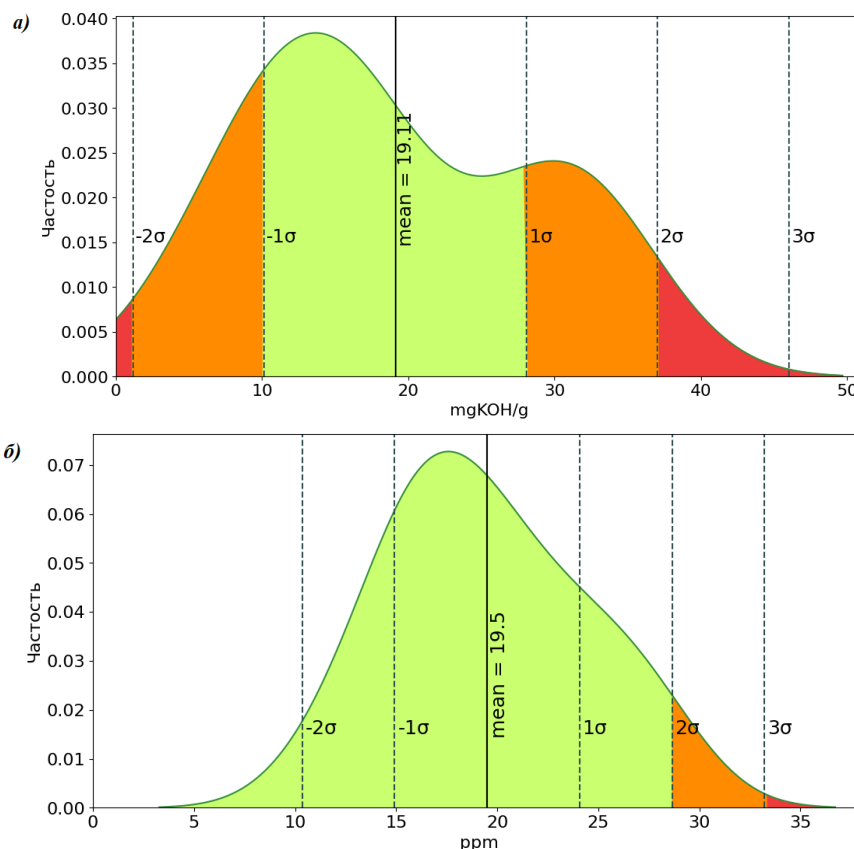
Ключевым элементом создаваемой эргатической системы является новый программный комплекс, использующий метод матрицы анализа процессов. На первом этапе составления матрицы необходимо сформировать перечень параметров, необходимых для определения масштаба процесса деградации, происходящего в системе. В данном примере были реализованы все параметры анализируемого материала согласно отчетам лабораторных исследований моторных масел судового дизельного двигателя MAN B&W Diesel Den 6L28/32A. Апробация метода проводилась на одном из видов масла, использованного в период наработки двигателя с 7121 по 22460 часов.

Этапы составления МПП

При составлении матрицы необходима нормировка количественных значений, то есть приведение к безразмерному числовому значению каждого параметра (E_{ij}) по шкале от 0 до 10. Это связано с тем, что параметры имеют различные единицы измерения. Перед переводом в кодированные значения устанавливаются предельные значения изменения факторов, то есть границы варьирования: $P_{вк}$ – верхняя контрольная граница, $P_{нк}$ – нижняя контрольная граница. Чаще всего данные по предельным значениям можно получить из справочной литературы или у производителя смазочного материала.

В Российской Федерации нормативные документы, регламентирующие эксплуатацию судовых технических средств, содержат требования и рекомендации, в том числе к предельным значениям работающих моторных масел [6, 7]. Согласно требованиям системы морского транспорта и закона нормального распределения с учетом физико-химических особенностей

анализируемого параметра приведен пример определения зон продуктивности элементов исследуемой системы (рис. 3). Щелочное число имеет рабочий диапазон с наилучшей производительностью – «зеленая зона», и продуктивность идет на спад по мере приближения к границам верхнего или нижнего допустимых пределов (рис. 3 а). Элементы металлических примесей, например железа, как правило, по физическому смыслу имеют только один допустимый предел, то есть «зеленая зона» будет ограничена односторонним допуском (рис. 3 б).



**Рис. 3. Кривые нормального распределения, построенные на основе статистических данных анализов масла:
а) BN, mgKOH/g; б) Fe, ppm**

Параметры, имеющие условно один допустимый предел, это те параметры, значения которых в наиболее низкой или наиболее высокой точке своей концентрации, более предпочтительны. При переводе к кодированным значениям элементов, фактические показатели которых имеют один приемлемый предел, предпочтение отдается присутствию этого элемента у низшей контрольной границы ($P_{НК}$). В таком случае используется выражение (1):

$$Э_{ij} = 10 * \frac{P_{Д} - P_{ВК}}{P_{НК} - P_{ВК}}, \quad (1)$$

где $Э_{ij}$ – нормированный элемент матрицы, $P_{Д}$ – фактическое значение параметра.

Для параметров, у которых более предпочтительны значения, приближающиеся к высшей контрольной границе, наивысший бал соответственно присваивается показателям, приближающимся к верхней контрольной границе. В этом случае используется выражение (2):

$$Э_{ij} = 10 * \frac{P_{Д} - P_{НК}}{P_{ВК} - P_{НК}}. \quad (2)$$

На рис. 4 представлено определение фактических значений параметров смазочного материала относительно верхней и нижней контрольных границ с формированием рейтинговых оценок. Так, из рис. 4 а следует, что среднее значение массовой доли содержания железа, согласно нашим расчетам, равняется 12 ppm, заявленные производителем граничные значения –

2–140 ppm, и при определении рейтинга наивысший балл присваивается границе с наименьшим значением.

Рисунок (4 б), в свою очередь, показывает критерий BN (щелочное число), где норма, заявленная производителем, определена как $BN > 7,5$, что говорит о том, что точка начала «зеленой зоны» будет определена указанным числовым выражением. Согласно обработке статистических данных, верхняя контрольная граница щелочного числа будет равняться 28,479 mgKOH/g.

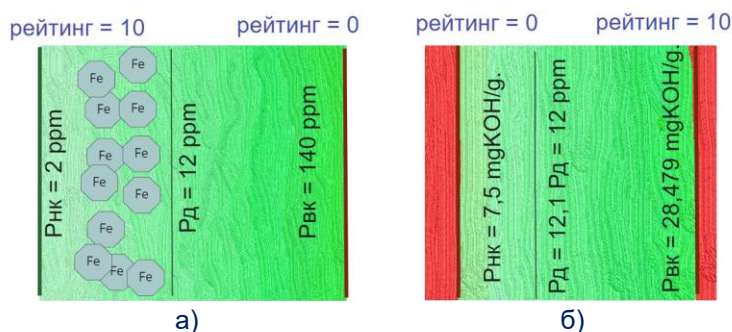


Рис. 4. Установление предельных и среднего значений:
а) Fe, ppm; б) BN, mgKOH/g

После перевода всех параметров смазочного материала в кодированные значения составляется матрица. Строками матрицы приняты нормированные физико-химические параметры. Таким образом, согласно результатам лабораторных исследований каждое из кодированных значений составляет тело матрицы, столбцами же обозначено время наработки в часах (3).

$$\begin{matrix}
 & T_1 & T_2 & \dots & \dots & T_j & \dots & T_m \\
 \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_i \\ \dots \\ P_n \end{matrix} & \begin{vmatrix} \mathcal{E}_{11} & \mathcal{E}_{12} & \dots & \dots & \mathcal{E}_{1j} & \dots & \mathcal{E}_{1m} \\ \mathcal{E}_{21} & \mathcal{E}_{22} & \dots & \dots & \mathcal{E}_{2j} & \dots & \mathcal{E}_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathcal{E}_{i1} & \mathcal{E}_{i2} & \dots & \dots & \mathcal{E}_{ij} & \dots & \mathcal{E}_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathcal{E}_{n1} & \mathcal{E}_{n2} & \dots & \dots & \mathcal{E}_{nj} & \dots & \mathcal{E}_{nm} \end{vmatrix}
 \end{matrix}, \tag{3}$$

Анализируя работоспособность масла при помощи данной матрицы, нужно оценить, как тот или иной элемент ведет себя в течение различных интервалов времени. Для этого построчно следует установить среднее значение и среднее квадратичное отклонение каждого исследуемого параметра в кодированных значениях. Низкое среднеквадратичное отклонение и среднее значение исследуемого параметра, в кодированных единицах близкое к 10, демонстрирует хорошо отлаженную систему, в то время как высокое стандартное отклонение показывает высокую изменчивость в ряду определенного элемента.

Общую эффективность каждой переменной в системе можно оценить, определив среднее значение, среднеквадратичное отклонение и вычислив индекс эффективности параметра. При вычислении только среднего значения истинное положение в структуре может быть искажено из-за преобладания слишком высоких значений над слишком низкими, поэтому целесообразно обратное суммирование значений по каждому параметру наблюдений.

Индекс эффективности каждого из параметров (ИЭФ) определяем следующим образом:

$$\text{ИЭФ}_i = F_i \cdot m, \quad i = 1, 2 \dots n, \tag{4}$$

где

$$\frac{1}{F} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{M_{ij}}, \tag{5}$$

M_{ij} – точка данных в профиле матрицы, m – строки, n – столбцы. В случае приближения числового значения точки данных профиля к нулю наблюдается картина уязвимости исследуемого параметра и, соответственно, индекс эффективности также будет приближаться к нулю.

Результаты исследования

Составление и оценка МПП проведены на основании результатов лабораторных исследований моторного масла за 15 339 часов наработки в режиме эксплуатации судового дизельного двигателя. Контрольных границ элементов были заявлены производителем. Расчеты среднего и среднеквадратичного отклонения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Среднее и среднеквадратичное отклонения элементов масла

Параметр	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение
Вязкость кинематическая при 100 °С	14,50	0,41
Температура вспышки (SETA)	190,00	0,00
Щелочное число (мг КОН/г)	19,11	9,37
Содержание нерастворимого осадка (объем, %)	0,29	0,26
Вода (объем, %)	0,11	0,07
Al (Алюминий)	5,50	1,78
Cr (Хром)	0,42	0,67
Cu (Медь)	0,25	0,45
Fe (Железо)	19,50	4,78
Ni (Никель)	39,50	14,31
Pb (Свинец)	0,42	0,67
Sn (Олово)	0,83	1,27
Na (Натрий)	33,78	8,12
Si (Кремний)	14,00	3,36
V (Ванадий)	119,75	36,35
Sb (Сурьма)	0,50	0,85

Перевод в кодированные значения выполнялся согласно требованию с использованием формул (1) и (2), после чего была составлена матрица параметров процесса с кодированными значениями (табл. 2).

Таблица 2

Матрица параметров процесса с кодированными значениями

Параметры	Время работы оборудования												ИЭФ
	7121	8392	9662	10930	12198	13480	13655	14890	16373	17490	19560	22460	
Al (Алюминий)	9,50	9,25	8,50	8,50	8,50	8,25	8,25	8,00	8,25	8,75	9,00	8,75	8,60
Cr (Хром)	10,00	10,00	9,75	9,50	10,00	9,75	9,75	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	9,89
Cu (Медь)	10,00	10,00	9,94	9,94	10,00	10,00	9,94	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	9,98
Fe (Железо)	9,14	8,86	8,57	8,00	8,79	8,43	8,14	8,29	8,71	8,93	8,86	8,57	8,59
Ni (Никель)	4,75	1,75	-0,50	-2,25	2,25	-2,75	-6,00	-4,00	1,75	6,00	2,00	-1,50	-8,41
Pb (Свинец)	10,00	10,00	10,00	9,94	9,94	10,00	10,00	10,00	9,94	10,00	10,00	9,88	9,97
Sn (Олово)	9,50	10,00	9,75	9,00	9,50	10,00	10,00	10,00	10,00	9,75	10,00	10,00	9,78
Na (Натрий)				4,86	6,57	5,57	5,14	4,00	5,29	6,71	5,43	3,00	4,90
Si (Кремний)	8,20	8,00	7,40	7,00	7,00	6,80	6,60	6,80	6,20	6,60	7,60	8,20	7,14
V (Ванадий)	-2,00	-9,00	-17,00	-20,80	-8,60	-19,60	-25,40	-22,60	-9,40	-7,60	-9,00	-16,40	-8,70
Вязкость кинематическая при 100 °С	6,02	6,24	6,27	6,39	6,02	6,02	6,63	6,51	5,90	6,02	6,99	7,59	6,35
Щелочное число (мгКОН/г)	2,19	2,15	0,24	-0,05	4,39	5,20	3,29	4,24	10,39	11,96	11,58	10,82	-0,83
Вода (объем%)	7,80	7,60	7,60	7,00	9,20	4,40	9,00	6,60	9,00	8,00	8,00	8,60	7,45
Температура вспышки (SETA)	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67
Содержание нерастворимого осадка (объем %)	8,20	7,60	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33	8,67	9,33	6,33	5,67	4,47	7,64

Как видно из табл. 2, кодированные значения по некоторым элементам ниже нуля, что в краткосрочном прогнозе указывает на серьезные отклонения в работе системы, а в долгосрочном, после определения индекса эффективности параметров за временной промежуток, – на то, что в план ремонта СЭУ есть необходимость включить мероприятия по установлению причины дестабилизации работы системы.

Применение МПП в разработке компьютерной программы анализа работы системы «масло–двигатель»

Метод МПП дает еще одну возможность определения уровня работоспособности масляной системы судового двигателя с применением максимально доступных для обслуживающего персонала средств. Разработка на основе метода МПП специализированного программного обеспечения является нетривиальной задачей, поскольку требует совмещения различных программно-аппаратных комплексов, способных оценивать техническое состояние судовых механизмов. Требование Международного кодекса по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращению загрязнений (МКУБ) предусматривает, что «компания должна определить оборудование и технические системы, внезапный отказ которых может создавать опасные ситуации» [3, с. 11]. Поэтому наличие дополнительного источника аналитических данных о работе двигателя может послужить вспомогательным средством при выработке решения о сроках и видах работ по техническому обслуживанию и ремонту силовой установки [2].

Таблица 3

Пример графического отображения результатов анализа методом МПП

цветовая шкала градации значений ИЭФ

Время работы оборудования	7121	8392	9662	10930	12198	13480	13655	14890	16373	17490	19560	22460
Al (Алюминий)	9,50	9,25	8,50	8,50	8,50	8,25	8,25	8,00	8,25	8,75	9,00	8,75
ИЭФ	9,50	9,37	9,06	8,92	8,83	8,73	8,66	8,57	8,53	8,55	8,59	8,60
Cr (Хром)	10,00	10,00	9,75	9,50	10,00	9,75	9,75	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
ИЭФ	10,00	10,00	9,92	9,81	9,85	9,83	9,82	9,84	9,86	9,87	9,88	9,89
Cu (Медь)	10,00	10,00	9,94	9,94	10,00	10,00	9,94	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
ИЭФ	10,00	10,00	9,98	9,97	9,97	9,98	9,97	9,98	9,98	9,98	9,98	9,98
Fe (Железо)	9,14	8,86	8,57	8,00	8,79	8,43	8,14	8,29	8,71	8,93	8,86	8,57
ИЭФ	9,14	9,00	8,85	8,62	8,65	8,62	8,54	8,51	8,53	8,57	8,60	8,59
Ni (Никель)	4,75	1,75	-0,50	-2,25	2,25	-2,75	-6,00	-4,00	1,75	6,00	2,00	-1,50
ИЭФ	4,75	2,56	-2,46	-2,41	-4,10	-3,79	-4,00	-4,00	-6,31	-7,93	-14,47	-8,41
Pb (Свинец)	10,00	10,00	10,00	9,94	9,94	10,00	10,00	10,00	9,94	10,00	10,00	9,88
ИЭФ	10,00	10,00	10,00	9,98	9,97	9,98	9,98	9,98	9,98	9,98	9,98	9,97
Sn (Олово)	9,50	10,00	9,75	9,00	9,50	10,00	10,00	10,00	10,00	9,75	10,00	10,00
ИЭФ	9,50	9,74	9,75	9,55	9,54	9,61	9,67	9,71	9,74	9,74	9,76	9,78
Na (Натрий)				4,86	6,57	5,57	5,14	4,00	5,29	6,71	5,43	3,00
ИЭФ				4,86	2,79	5,58	5,46	5,09	5,12	5,30	5,32	4,90
Si (Кремний)	8,20	8,00	7,40	7,00	7,00	6,80	6,60	6,80	6,20	6,60	7,60	8,20
ИЭФ	8,20	8,10	7,85	7,62	7,49	7,36	7,24	7,18	7,06	7,01	7,06	7,14
V (Ванадий)	-2,00	-9,00	-17,00	-20,80	-8,60	-19,60	-25,40	-22,60	-9,40	-7,60	-9,00	-16,40
ИЭФ	-2,00	-3,27	-4,48	-5,57	-5,99	-6,78	-7,57	-8,26	-8,37	-8,29	-8,35	-8,70
Вязкость кинематическая при 100⁰С	6,02	6,24	6,27	6,39	6,02	6,02	6,63	6,51	5,90	6,02	6,99	7,59
ИЭФ	6,02	6,13	6,17	6,23	6,18	6,16	6,22	6,25	6,21	6,19	6,26	6,35
Щелочное число (мгКОН/г)	2,19	2,15	0,24	-0,05	4,39	5,20	3,29	4,24	10,39	11,96	11,58	10,82
ИЭФ	2,19	2,17	0,59	-0,25	-0,32	-0,39	-0,46	-0,54	-0,61	-0,68	-0,75	-0,83
Вода (объем%)	7,80	7,60	7,60	7,00	9,20	4,40	9,00	6,60	9,00	8,00	8,00	8,60
ИЭФ	7,80	7,70	7,67	7,49	7,78	6,90	7,13	7,06	7,24	7,30	7,36	7,45
Температура вспышки (SETA)	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67
ИЭФ	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67
Содержание нерастворимого осадка (объем %)	8,20	7,60	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33	8,67	9,33	6,33	5,67	4,47
ИЭФ	8,20	7,89	8,32	8,55	8,70	8,80	8,87	8,84	8,90	8,55	8,17	7,64

Для эффективной визуальной категоризации технического состояния масляной системы при использовании метода МПП, вывод данных для пользователя предлагается в виде цветовых значений (табл. 3). После определения ИЭФ для визуального восприятия данные окрашиваются от темно-красного, где показатели индекса переходят в минусовые значения, до светло-зеленого, означающего эффективную работу системы по рассматриваемому параметру. Такой подход к оценке масляной системы позволяет не только отследить, как стабильно она работает на момент анализа, но и обнаружить, в какой момент произошел сбой и какое влияние оказывают меры, принимаемые для устранения причин сбоя, будь то замена узлов и деталей или смена смазки.

Обсуждение результатов

Естественное изнашивание механизмов СЭУ под нагрузкой – существенный, но не единственный источник отказов в работе. Причинами выхода из строя узлов и деталей судового двигателя могут быть: индивидуальные конструкторские особенности энергетической установки; некачественные материалы деталей узлов, а также просчеты при их монтаже; эксплуатация двигателя в режиме перегрузки; использование масел и топлива несоответствующих характеристик [4]. Отражением той или иной проблемы служат в том числе и регулярные проверки состояния состава масла, осуществляемые посредством контроля измеряемых параметров и объема долей металлических включений. Многие суда, кроме всевозможных датчиков и регламентированных средств контроля технических систем, имеют программное обеспечение, помогающее управлять техническим обслуживанием и планированием работ по осмотрам и ремонтам, в том числе СЭУ. Программа, основанная на методе МПП, может стать дополнением к интеллектуальным программам или может быть установлена как самостоятельное средство сбора статистических данных по износу и работе в режиме эксплуатации каждого конкретного двигателя.

Для полноты прогноза требуется создание библиотеки возможных последствий выхода анализируемого параметра за предельные значения. Таким образом, при подсчете индекса эффективности, кроме выделения цветом, на элементах, значения которых попадают в красную зону (ИЭФ от -10 до $6,1$), должно появляться «всплывающее окно» с предложением обратить внимание на те или иные механизмы, износ или дефект которых вызывает изменение данного параметра (рис. 5). Формировать базу данных для библиотеки последствий предлагается на основе общей статистики по частоте выхода из строя того или иного механизма СЭУ и связанных с этим отказом сдвигов показателей параметров. База данных также должна иметь возможность добавления оператором зафиксированных поломок (замен, ремонтов), таким образом подстраиваясь под индивидуальные особенности обслуживаемой СЭУ. Аналитический материал, полученный из дополненных баз данных, позволит уточнить применяемые в методе МПП граничные значения для каждого конкретного типа и модели судового двигателя.



Рис. 5. Пример всплывающего окна МПП

В функционирующей СЭУ загрязнение масла – процесс постоянный, он обусловлен попаданием в масляную систему продуктов неполного сгорания топлива, частиц износа механизмов, элементов, возникающих как результат окисления и термического воздействия. предотвра-

титель старение масла невозможно, но отсрочить этот процесс, сохранив стабильную работу двигателя, вполне реально. Установленные на современных судах программные продукты, целью которых является контроль и учет технических элементов, с интеграцией в них программы по анализу масла, основанной на методе МПП, могут дать хорошие результаты как в долгосрочной, так и краткосрочной перспективе, повысив качество контроля за техническим состоянием СЭУ и улучшив процесс последующего технического обслуживания и ремонта, что естественно повысит уровень безопасности, энергоэффективности, технологичности и экологичности топливно-энергетических систем судов.

Заключение

Методика обработки данных по физико-химическим показателям моторных масел, применяемых в СЭУ на основе МПП, позволяет прогнозировать изменение состояния технической системы масло–двигатель во времени, а также управлять процессом потери рабочих характеристик смазочного материала, оценивать скорость деградиационных процессов элементов двигателя, планировать операции по его техническому обслуживанию и ремонту и оценивать их последующую эффективность. Предложенная методика-аналитически опробована и служит базой для разработки компьютерной программы. Выделим несколько задач, стоящих перед программным комплексом, создаваемым на основе метода МПП.

Во-первых, программа позволит упростить принятие решения службой старшего механика по планированию технического обслуживания подконтрольных механизмов.

Во-вторых, при загрузке результатов регулярно проводимых исследований работающего масла программа, основанная на МПП, в цифровом и графическом виде будет сообщать о состоянии подконтрольной системы на любом интервале наработки двигателя. В свою очередь, это позволяет определить, в какой промежуток времени произошло то или иное событие, повлекшее за собой выход параметров за границы нормы. Программа может не только иметь индивидуальное исполнение, но и служить надстройкой путем интеграции в более крупные и сложные программные комплексы по планированию технического обслуживания механизмов на флоте.

В-третьих, программное обеспечение позволит сформировать базу аналитической информации, необходимой для повышения качества разработки судовых двигательных установок, особенно в контексте учета усталостных и динамических нагрузок, коррозионного и фрикционного воздействий. Данные материалы позволят производителям и проектировщикам двигателей провести сравнительный анализ результатов применения сконструированных механизмов с начальными проектными решениями и ожиданиями (сроками наработки на отказ, спецификой выхода оборудования из строя). Подобная аналитика будет крайне важной для последующей разработки комплекса мер по повышению качества технического обслуживания и ремонта судовых энергетических установок, поскольку накопление информации и анализ отработанных масел по каждому определенному двигателю во времени дают представление о наиболее частых отказах элементов, приводя к типизации неисправностей определенных моделей двигателя в конкретных временных промежутках [5].

Перспективой дальнейшей разработки данного программного обеспечения, помимо вышеизложенных задач, может стать создание интеллектуальной системы с возможностью распознавания дефектов и определения рисков наступления аварийного состояния.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Биргер И.А. Техническая диагностика. Москва: Машиностроение, 1978. 240 с.
2. Булгаков С.П. Международный кодекс по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения (МКУБ) // Транспорт: наука, техника, управление. 2014. № 9. С. 42–47.

3. Международный кодекс по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения. Резолюция ИМО А.741(18). 1995.
4. Мясников Ю.Н., Никитин В.С., Равин А.А. Эксплуатационные дефекты судовых дизельных и газотурбинных двигателей // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. № 3(385). С. 85–100.
5. Равин А. А. Актуальные задачи диагностики морских газотурбинных двигателей // Судостроение. 2012. № 3. С. 42–44.
6. РД 31.2.07-2001. Топлива, масла, смазки и специальные жидкости для судов морского транспорта. Номенклатура и область применения / Минтранс РФ; Гос. служба Морского флота. Санкт-Петербург, 2001. 77 с.
7. ЯКУТ.12-001-97 Сборник инструкций по браковочным показателям всех видов смазочных и гидравлических масел, применяемых на судах морского флота: нормативный документ. Введ. 1997-04-15. Ленинград: ЦНИИМФ, 1997. 34 с
8. Cong Y., Gan H., Wang H. Parameter investigation of the pilot fuel post-injection strategy on performance and emissions characteristics of a large marine two-stroke natural gas-diesel dual-fuel engine. *Fuel*. 2022;323:124404.
9. Coraddu A. et al. Marine dual fuel engines monitoring in the wild through weakly supervised data analytics. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2021;100:104179.
10. Grimmig R. et al. Analyses of used engine oils via atomic spectroscopy – Influence of sample pretreatment and machine learning for engine type classification and lifetime assessment. *Talanta*. 2021;232:122431.
11. Howard K. Advanced engine oils. *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*. Woodhead Publishing, 2022. P. 173–195.
12. Liu J. S., Thompson G. The multi-factor design evaluation of antenna structures by parameter profile analysis. *Journal of Engineering Manufacture*. 1996;210(5):449–456.
13. Myagkov L.L. et al. Conventional and advanced internal combustion engine materials *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*. Woodhead Publishing, 2022. P. 353–412.
14. Tung S.C., Gao H. Tribological characteristics and surface interaction between piston ring coatings and a blend of energy-conserving oils and ethanol fuels. *Wear*. 2003;255(7–12):1276–1285.
15. Wang P. et al. Experimental investigation of the effects of Miller timing on performance, energy and exergy characteristics of two-stage turbocharged marine diesel engine. *Fuel*. 2021;292:120252.
16. Wang R., Chen H., Guan C.A Bayesian inference-based approach for performance prognostics towards uncertainty quantification and its applications on the marine diesel engine. *ISA transactions*. 2021;118:159–173.
17. Wang R. et al. Research on the fault monitoring method of marine diesel engines based on the manifold learning and isolation forest. *Applied Ocean Research*. 2021;112:102681.
18. Wolak A. et al. Identifying and modelling changes in chemical properties of engine oils by use of infrared spectroscopy. *Measurement*. 2021;186:110141.
19. Qu C. et al. Predictive anomaly detection for marine diesel engine based on echo state network and autoencoder. *Energy Reports*. 2022;8:998–1003.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 4/53

Ship Power Plantswww.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/85-95>

Mazur E., Shcherban P., Mazur V.

EKATERINA V. MAZUR, Assistant, Lecturer, EVMazur@kantiana.ruPAVEL S. SHCHERBAN, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
ursa-maior@yandex.ruVALERIA S. MAZUR, Postgraduate Student, vmazur@kantiana.ru

Educational and scientific cluster “Institute of High Technologies”

Immanuel Kant Baltic Federal University

Kaliningrad, Russia

Marine engine oil performance study using a process parameter matrix

Abstract. In this study a method has been developed that allows to increase the service life of mechanisms and improve the reliability of ship equipment in operating conditions. The effect is achieved by detecting the most significant and influential parameters of the motor oil used, establishing boundary values for each of them and determining the degree of deviation of the actual parameters from the boundary parameters. The processing of an array of physical and chemical data on engine oil, taking into account the time between failures of equipment, is carried out by a specialized computer program being developed for monitoring the state of a marine engine in operation. The designed software package allows to maintain of the SPP (ship power plant) more accurate and timelier.

Keywords: parameter matrix method, engine oil, marine engine, bearing wear, oil analysis

For citation: Mazur E., Shcherban P., Mazur V. Marine engine oil performance study using a process parameter matrix. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):85–95. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Birger I. A. *Texnicheskaya diagnostika. Mashinostroenie*, 1978. 240 p. (In Russ.).
2. Bulgakov S.P. International Code for the Management of the Safe Operation of Ships and Pollution Prevention (ISM Code). *Transport: science, equipment, management*. 2014;(9):42–47. (In Russ.).
3. International Management Code for the Safe Operation of Ships and Pollution Prevention. IMO Resolution A.741(18). 1995. (In Russ.).
4. Myasnikov Yu.N., Nikitin V.S., Ravin A.A. Operational defects of marine diesel and gas turbine engines. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2018;(3):85–100. (In Russ.).
5. Ravin A.A. Actual problems of diagnostics of marine gas turbine engines. *Shipbuilding*. 2012;(3):42–44. (In Russ.).
6. RD 31.2.07-2001. *Topлива, masla, smazki i special'ny'e zhidkosti dlya sudov morskogo transporta. Nomenklatura i oblast' primeneniya*. Mintrans RF; Gosudarstvennaya sluzhba Morskogo flota. SPb., 2001. 77 p. (In Russ.).
7. YAKUT.12-001-97 *Sbornik instruktsii po brakovochnym pokazatelyam vsekh vidov smazochnykh i gidravlicheskiy masel, primenyaemykh na sudakh morskogo flota: normativnyi dokument*. Vved. 1997-04-15. Leningrad, TSNIIMF, 1997. 34 p. (In Russ.).
8. Cong Y., Gan H., Wang H. Parameter investigation of the pilot fuel post-injection strategy on performance and emissions characteristics of a large marine two-stroke natural gas-diesel dual-fuel engine. *Fuel*. 2022;323:124404.
9. Coraddu A. et al. Marine dual fuel engines monitoring in the wild through weakly supervised data analytics. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2021;100:104179.
10. Grimmig R. et al. Analyses of used engine oils via atomic spectroscopy – Influence of sample pretreatment and machine learning for engine type classification and lifetime assessment. *Talanta*. 2021;232:122431.
11. Howard K. *Advanced engine oils. Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*. Woodhead Publishing, 2022. P. 173–195.
12. Liu J.S., Thompson G. The multi-factor design evaluation of antenna structures by parameter profile analysis. *Journal of Engineering Manufacture*. 1996;210(5):449–456.
13. Myagkov L.L. et al. *Conventional and advanced internal combustion engine materials Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*. Woodhead Publishing, 2022. P. 353–412.
14. Tung S.C., Gao H. Tribological characteristics and surface interaction between piston ring coatings and a blend of energy-conserving oils and ethanol fuels. *Wear*. 2003;255(7–12):1276–1285.
15. Wang P. et al. Experimental investigation of the effects of Miller timing on performance, energy and exergy characteristics of two-stage turbocharged marine diesel engine. *Fuel*. 2021;292:120252.
16. Wang R., Chen H., Guan C.A Bayesian inference-based approach for performance prognostics towards uncertainty quantification and its applications on the marine diesel engine. *ISA transactions*. 2021;118:159–173.
17. Wang R. et al. Research on the fault monitoring method of marine diesel engines based on the manifold learning and isolation forest. *Applied Ocean Research*. 2021;112:102681.
18. Wolak A. et al. Identifying and modelling changes in chemical properties of engine oils by use of infrared spectroscopy. *Measurement*. 2021;186:110141.
19. Qu C. et al. Predictive anomaly detection for marine diesel engine based on echo state network and autoencoder. *Energy Reports*. 2022;8:998–1003.

Водоснабжение, строительные системы охраны водных ресурсов

Научная статья

УДК 681.5

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/96-101>

Р.Е. Тиганов, А.П. Панфилов, Р.А. Тихонов

ТИГАНОВ РОМАН ЕВГЕНЬЕВИЧ – аспирант, tiganov_re@dvfu.ruПАНФИЛОВ АЛЕКСАНДР ПАВЛОВИЧ – аспирант, panfilov_ap@dvfu.ru

Департамент электроники, телекоммуникации и приборостроения

Политехнический институт

ТИХОНОВ РУСЛАН АЛЕКСАНДРОВИЧ – бакалавр, tikhonov.re@students.dvfu.ru

Департамент математического и компьютерного моделирования

Институт математики и компьютерных технологий

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Модель многоканальной системы контроля температуры воды в аквариумных танках

Аннотация. В статье предложена модель многоканальной системы контроля температуры в двух реализациях, проверена работоспособность систем и соответствие заданным требованиям, приведены результаты проделанной работы. Поставлена задача-по разработке удобного для пользователя и финансово эффективного решения контроля температуры в аквариумных танках больших океанариумных комплексов.

Ключевые слова: контроль температуры, одноплатный компьютер, система на кристалле, визуальный язык программирования, пользовательский интерфейс

Для цитирования Тиганов Р.Е., Панфилов А.П., Тихонов Р.А. Модель многоканальной системы контроля температуры воды в аквариумных танках // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 96–101.

Введение

В нашей стране и за ее пределами строятся новые и реконструируются старые океанариумы, развивается аквакультура животных и растений. Совершенствуются традиционные пресноводные и морские аквариумы, усложняется и оптимизируется их оборудование.

Важнейшим экологическим фактором среды является температура, от которой напрямую зависят обмен веществ и развитие гидробионтов. Большинство водных организмов приспособлено к обитанию в среде с определенным температурным диапазоном, в пределах которого их метаболические процессы функционируют с наибольшей эффективностью. Отклонение параметров среды от оптимальных значений ведет к стрессовым реакциям и активации ряда защитных механизмов [2].

Вопрос контроля температуры среды обитания гидробионтов является довольно актуальным, в особенности, когда речь идет о системах жизнеобеспечения морских млекопитающих. Существует множество систем контроля и автоматического управления, построенных на базе промышленных программируемых логических контроллеров, которые характеризуются высокой стоимостью, а также громоздким программным обеспечением, что вызывает неудобства в работе специалистов диспетчерских служб. В отличие от систем автоматического управления к системам контроля не предъявляются требования применимые к системам ав-

томатического управления, а если она не является основной, то требования ограничиваются только электробезопасностью и использованием локальных сетей передачи данных. Для реализации системы контроля температуры, необходимо использовать современные гибкие решения с интуитивно понятным интерфейсом и хорошо задокументированными библиотеками программных инструментов.

Целью исследования является разработка модели многоканальной системы контроля температуры для оперативного дистанционного получения информации о состоянии систем жизнеобеспечения (СЖО) гидробионтов.

Основные задачи:

- 1) разработка системы формирования сигналов и их регистрации с использованием оборудования National Instruments;
- 2) разработка системы формирования сигналов и их регистрации с использованием одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 и цифрового датчика температуры DS18B20;
- 3) разработка систем передачи зарегистрированных сигналов по локальной сети передачи данных;
- 4) разработка интерфейса для отображения показаний динамики изменения температуры.

1. Реализация с использованием оборудования National Instruments и среды разработки LabVIEW

Для решения поставленной задачи была построена модель системы с использованием среды разработки LabVIEW и многофункционального устройства USB 6361.

Модель данной системы состоит из следующих ключевых элементов: персональный компьютер с программным обеспечением LabVIEW [3], многофункциональное устройство USB 6361, коннекторный блок BNC–2120 [1], термопара типа К и термисторы В57045–К (рис. 1).

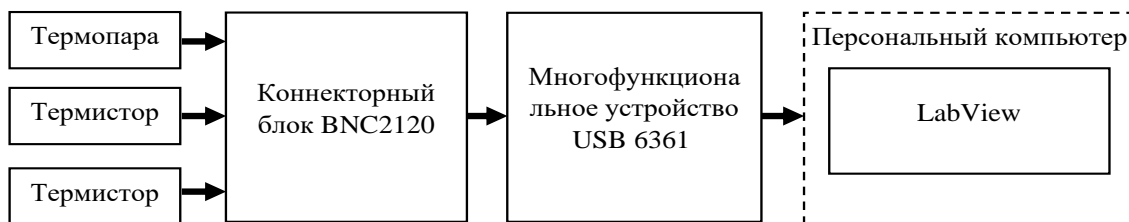


Рис. 1. Структурная схема модели многоканальной системы для мониторинга температуры

Функциональные возможности измерительных приборов в BNC–2120 построены на основе многофункционального устройства ввода–вывода (DAQ), настольной рабочей станции и программ, разработанных в среде LabVIEW. Для реализации модели с учетом всех требований технического задания, в том числе и обеспечения сетевых функций, требуется разработать виртуальные приборы, выполняющие роли серверной и клиентской части системы формирования сигналов и их регистрации (рис. 2).

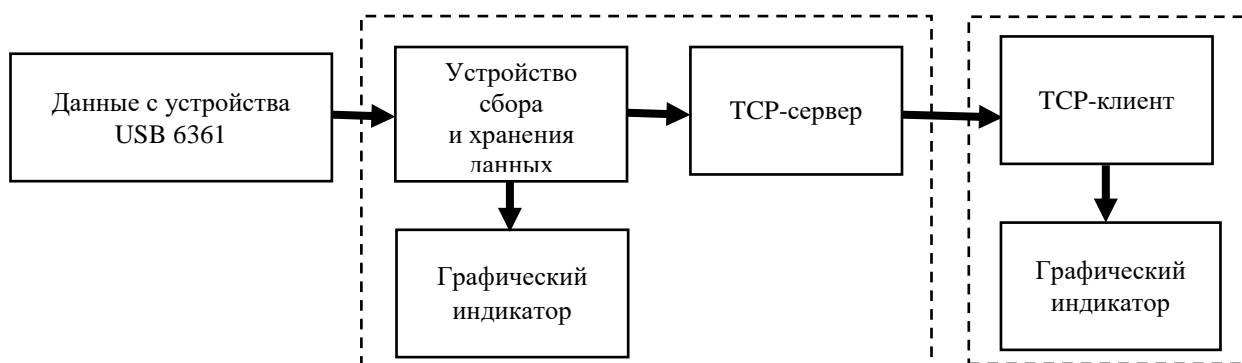


Рис. 2. Блок-схема программных модулей в среде LabVIEW

Данные, полученные с датчиков температуры, преобразованные в цифровой вид с помощью устройства USB-6361, попадают в устройство сбора и хранения данных, после чего поступают в модуль графического индикатора, где происходит построение графиков зависимости температуры исследуемого объекта от времени. В то же время устройство сбора и хранения данных посылает их в модуль TCP-сервера, предназначенного для передачи в локальной сети. Далее данные попадают в модуль TCP-клиента, передаются в модуль графического индикатора, где дублируются графики зависимости температуры исследуемого объекта от времени.

2. Реализация с использованием одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 и цифрового датчика температуры DS18B20

Вторая реализация задач осуществлялась на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 и цифрового датчика температуры DS18B20.

Raspberry Pi – это малогабаритный одноплатный компьютер, плата имеет процессор, оперативное запоминающее устройство и аппаратные порты, которые отсутствуют в стандартных компьютерах. Главной операционной системой для Raspberry Pi является Raspbian, которая основана на Debian. Хотя основной поддерживаемой операционной системой является Raspbian, можно установить и другие операционные системы, такие как Ubuntu mare, Ubuntu Core, OSMC, RIS OS, Windows 10 IoT и др. [3]. Существует несколько версий этого компьютера, которые различаются размерами, ценой и техническими характеристиками.

Система измерения температуры на основе датчика DS1820 в отличие от обычных термисторов обладает следующими преимуществами:

- датчик калиброван на заводе-производителе и выдает цифровой код температуры;
- не требует калибровки, как системы с терморезисторами, где необходима калибровка устройства;
- на точность измерений не влияет длина проводов;
- возможность хранить данные на одноплатный компьютер;
- возможность подключить несколько датчиков на один адаптер и просматривать их в окне одной программы;

Основная функция микросхемы DS18B20 [3] (рис. 3) – трансформация показаний встроенного датчика температуры в цифровой код. Это преобразование зависит от разрешения преобразования, установленного пользователем, которое настраивается от 9 до 12 бит. Если настройки не производились, то установка регистра конфигурации соответствует 12 битам.

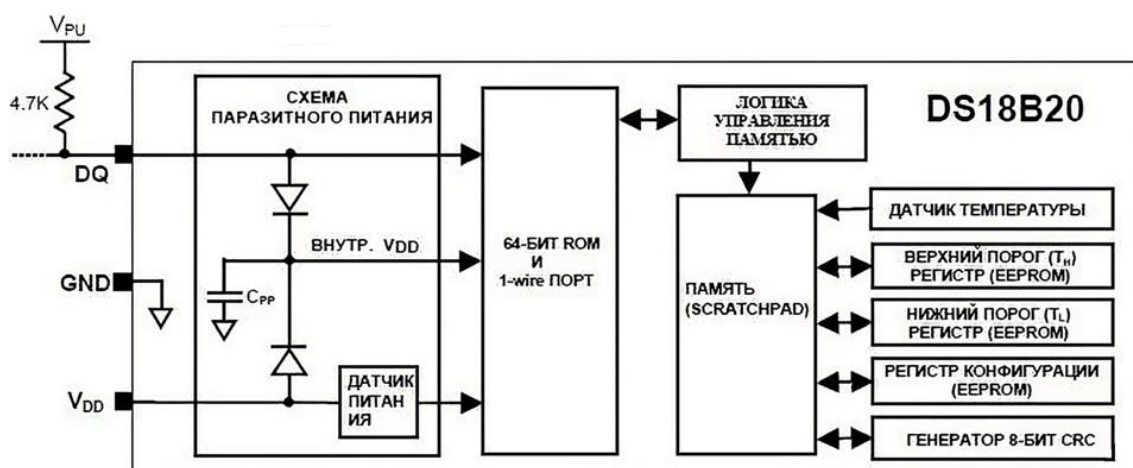


Рис. 3. Блок-схема датчика температуры цифрового DS18B20

После снятия и обработки сигнала с датчика температуры в микросхеме DS18B20 полученные данные в градусах Цельсия сохраняются в виде 16-битного числа с признаком (S), который отвечает за знак «+» или «-» температуры. Если показания температуры выше «0», то показатель S=0, если же значение температуры отрицательное, то S=1.

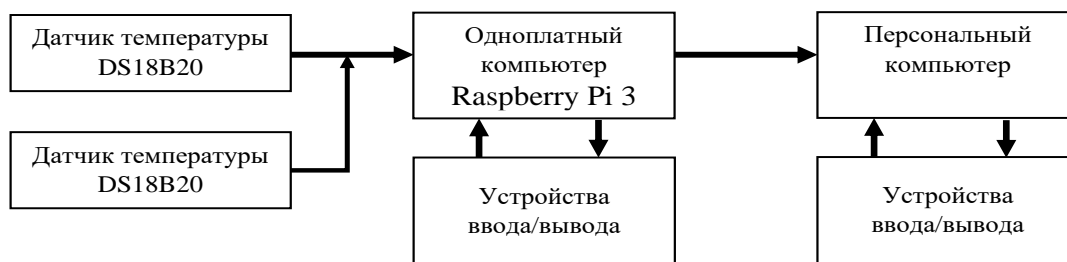


Рис. 4. Блок-схема модели многоканального измерителя температуры на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 3

Проверка работоспособности систем

Для проверки системы были разработаны пользовательские интерфейсы в виде графиков зависимости температуры от времени. Для эксперимента использовались два персональных компьютера, подключенных к локальной сети, программное обеспечение LabVIEW, многофункциональное устройство USB 6361, коннекторный блок BNC2120 и термистор B57045-K (рис. 5).

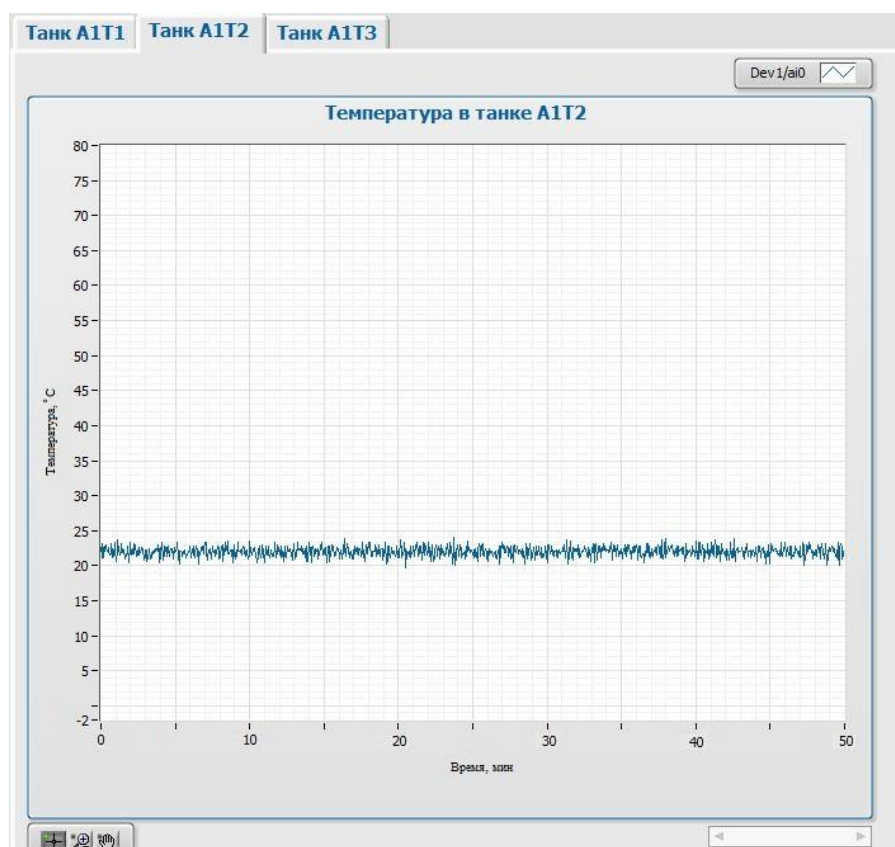


Рис. 5. Интерфейс с использованием термистора B57045-K

В ходе экспериментов было выявлено, что погрешность работы измерения – не более $0,1^{\circ}\text{C}$, что достаточно для подавляющего числа задач. Частота взятия выборок – не менее 1 раза в секунду. Потерь при передаче и записи данных выявлено не было.

Для проверки работоспособности системы на основе одноплатного компьютера Raspberry Pi был разработан интерфейс в виде графика зависимости температуры от времени и проведена проверка работы датчика с различным временем опроса.

Результаты эксперимента показали, что погрешность работы измерения не более $0,1^{\circ}\text{C}$ при периоде опроса 400 мс, что, в свою очередь, более чем в 2 раза больше измеренной в предыдущей реализации.

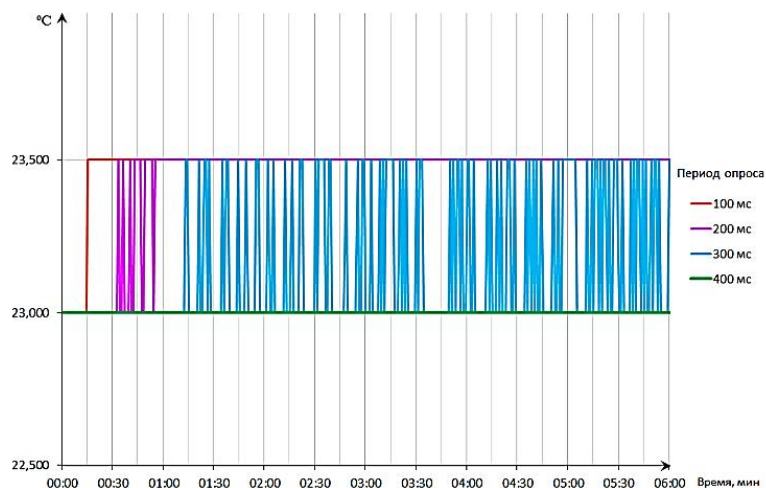


Рис. 6. Интерфейс с использованием датчика температуры DS18B20

Выводы

Разработана модель системы формирования сигналов и их регистрации с помощью оборудования National Instruments и среды разработки LabVIEW с использованием визуального языка программирования G. В данной модели была реализована передача зарегистрированных по локальной сети передачи данных, а также разработан пользовательский интерфейс с возможностью переключения между каналами для отображения показаний динамики изменения температуры. Также была предложена реализация модели многоканальной системы контроля температуры с использованием одноплатного компьютера Raspberry Pi и цифровых датчиков температуры DS18B20. Данная реализации является удобной в настройке и проведении пусконаладочных работ, так как одноплатные компьютеры представляют собой законченные вычислительные системы, которые включают процессор, память, систему питания, периферию и разъемы. Помимо этого, использование цифрового термометра DS18B20 с интерфейсом 1-wire позволяет подключить до 100 датчиков на один GPIO ввод, что может обеспечить контроль температуры всех систем жизнеобеспечения главного корпуса научно-образовательного комплекса «Приморский океанариум».

Обе модели подходят для решения задач контроля температуры, их различия в стоимости решения и привязке к аппаратной базе. В решении с оборудованием National Instruments преимуществом является промышленный класс оборудования, но в то же время стоимость и возможные проблемы с приобретением данного оборудования могут быть неприемлемыми. В случае с решением на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi и цифровых датчиков температуры DS18B20 преимуществом является низкая цена аппаратной составляющей и большой инструментарий для создания программного обеспечения, но отсутствие у оборудования промышленной сертификации требует дополнительных инженерных изысканий.

Для развития данной работы и возможного внедрения в систему автоматического управления необходимы внесения конструктивных новых решений, а также проработка вопросов промышленной и информационной безопасности [4].

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарский А.П. Динамическое моделирование непрерывных технологических процессов в среде LabVIEW. Иваново: Изд-во Ивановского государственного химико-технологического университета, 2022. С. 8–15.
2. Cai M., Wang Y., Wang S., Wang R., Cheng L., Tan M. Predictionbased seabed terrain following control for an underwater vehiclemanipulator system. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 2019;51:4751–4760.
3. DS18S20 High-Precision 1-Wire Digital Thermometer. URL: www.datasheets.maxim-ic.com/en/ds/-DS18S20.pdf – 10.09.2022.

4. Shakor Zaidoon, Fawzi Aymen. Application of LabVIEW and Genetic Algorithm for controlling of Plate Heat Exchanger. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*. 2018;(4):125–135.
5. Xu F., Wang H., Wang J., Au, K.W.S., Chen W. Underwater dynamic visual servoing for a soft robot arm with online distortion correction. *IEEE/ASME Trans. Mechatron*. 2019;24:979–989.
6. Yue C., Hong C., Ye C. Design of a wearable sensing system for a lower extremity exoskeleton. *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2017, August 06-09, Takamatsu, Japan. P. 464–468. DOI: 10.1109/ICMA.2017.8015861

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 4/53

Water Supply, Building Systems for Water Resources Protectionwww.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/96-101>

Tiganov R., Panfilov A., Tikhonov R.

ROMAN E. TIGANOV, Postgraduate Student, tiganov_re@dvfu.ruALEXANDER P. PANFILOV, Postgraduate Student, panfilov_ap@dvfu.ru✉

Department of Electronics and Communications

Polytechnic Institute

RUSLAN A. TIKHONOV, Bachelor, tikhonov.re@students.dvfu.ru

Department of Mathematical and Computer Modeling

Institute of Mathematics and Computer Technologies

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Model of a multi-channel water temperature control system in aquarium tanks

Abstract. The article proposes models of multichannel temperature control systems in two implementations, checks the performance of systems and compliance with specified requirements, and also presents the results of the work done. This article aims to present a user-friendly and cost-effective solution for monitoring the temperature in aquarium tanks of large aquarium complexes.

Keywords: temperature monitoring, single board computer, system on a chip, visual programming language, user interface

For citation: Tiganov R., Panfilov A., Tikhonov R. Model of a multi-channel water temperature control system in aquarium tanks. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):96–101. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Samarsky A.P. Dynamic modeling of continuous technological processes in the LabView environment. Ivanovo, Publishing House of the Ivanovo State University of Chemical Technology, 2022. P. 8–15. (In Russ.).
2. Cai M., Wang Y., Wang S., Wang R., Cheng L., Tan M. Predictionbased seabed terrain following control for an underwater vehiclemanipulator system. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern*. 2019;51: 4751–4760.
3. DS18S20 High-Precision 1-Wire Digital Thermometer. URL: www.datasheets.maximic.com/en/ds/DS18S20.pdf – 10.09.2022.
4. Shakor Zaidoon, Fawzi Aymen. Application of LabVIEW and Genetic Algorithm for controlling of Plate Heat Exchanger. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*. 2018;(4):125–135.
5. Xu F., Wang H., Wang J., Au K.W.S., Chen W. Underwater dynamic visual servoing for a soft robot arm with online distortion correction. *IEEE/ASME Trans. Mechatron*. 2019;24:979–989.
6. Yue C., Hong C., Ye C. Design of a wearable sensing system for a lower extremity exoskeleton. *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2017, August 06-09, Takamatsu, Japan. 2017. P. 464–468. DOI: 10.1109/ICMA.2017.8015861

Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов

Научная статья

УДК 626.027

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/102-111>

К.Ю. Кириченко, В.А., Черноусов, И.А. Вахнюк, С.Г. Паршин, А.Г. Масютин,
А.В. Гридасов, А.В. Погодаев, К.С. Пикула, К.С. Голохваст

КИРИЧЕНКО КОНСТАНТИН ЮРЬЕВИЧ – к.б.н., научный сотрудник НОЦ «Нанотехнологии»,
kirichenko@sfscs.ru

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук
Краснообск, Россия

ЧЕРНОУСОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ – научный сотрудник, chernousov@sfscs.ru

ВАХНЮК ИГОРЬ АНАТОЛЬЕВИЧ – младший научный сотрудник сектора информационного
обеспечения СибИМЭ, vakhniuk@sfscs.ru

ГОЛОХВАСТ КИРИЛЛ СЕРГЕЕВИЧ – д.б.н., профессор, главный научный сотрудник лабора-
тории токсикологии и пестицидов, golokhvast@sfscs.ru

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук,
Краснообск, Россия

ПАРШИН СЕРГЕЙ ГЕОРГИЕВИЧ – д.т.н., профессор, профессор Высшей школы физики
и технологий материалов, parshin@spbstu.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Санкт-Петербург, Россия

МАСЮТИН АЛЕКСАНДР ГЕОРГИЕВИЧ – к.б.н., научный сотрудник лаборатории гистологии,
imber.acidis@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8067-4261>

Кафедра клеточной биологии и гистологии

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Москва, Россия

ГРИДАСОВ АЛЕКСАНДР ВАЛЕНТИНОВИЧ – к.т.н., доцент, директор Департамента промыш-
ленной безопасности, gridasov.av@dvfu.ru

ПОГОДАЕВ АНТОН ВАСИЛЬЕВИЧ – старший преподаватель, директор Центра компетенций
в области испытаний материалов Департамента промышленной безопасности,
pogodaev.av@dvfu.ru

ПИКУЛА КОНСТАНТИН СЕРГЕЕВИЧ – к.б.н., ассистент Департамента нефтегазовых техно-
логий и нефтехимии, pikula_ks@dvfu.ru

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Исследование морфологического состава частиц в пробах воды при подводной сварке

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию морфологического строения твердых частиц, сформированных при подводной сварке. Рассмотрены частицы, сформированные при двух разных технологических процессах: при использовании электродов и при использовании проволоки. Сформированные твердые частицы подводной сварки имеют разнородную форму, представлены наиболее распространенные типы, для которых выполнен спектральный анализ.

Ключевые слова: подводная сварка, наночастицы, микрочастицы, экология

© Кириченко К.Ю., Черноусов В.А., Вахнюк И.А., Паршин С.Г., Масютин А.Г., Гридасов А.В., Погодаев А.В., Пикула К.С., Голохваст К.С., 2022.

Статья поступила: 01.11.2022; рецензирование: 08.12.2022; финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-24-01169 «Изучение влияния производных компонентов подводной сварки на гидробионтов».

Для цитирования: Кириченко К.Ю., Черноусов В.А., Вахнюк И.А., Паршин С.Г., Масютин А.Г., Гридасов А.В., Погодаев А.В., Пикула К.С., Голохваст К.С. Исследование морфологического состава частиц в пробах воды при подводной сварке // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 102–111.

Введение

Современные способы подводной сварки настолько разнообразны, что позволяют выполнять неразъемные соединения всех металлов, которые используются в технике. Разработаны и внедрены в промышленность следующие методы: сварка трением, ультразвуковая сварка, сварка плазменно-дуговая, сварка в вакууме, взрывом, лучом лазера и др. [4]. Нашел широкое применение и метод подводной сварки ввиду того, что в ряде случаев не представляется возможным поднять подводные сооружения на поверхность воды с транспортировкой в сухие доки для проведения плановых или аварийных ремонтных работ, поэтому необходимо проведение качественных работ под водой. Следует отметить, что метод подводной сварки имеет ряд особенностей, как правило связанных с ограниченностью пространства и времени для производства работ, а также недостаточной видимостью и рядом других факторов воздействия.

Подводная сварка применяется в различных отраслях промышленности, разработанные технологические решения позволяют быстро и эффективно производить ремонтные и монтажные работы для судостроения, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений, значительно минимизируя затраты труда [1].

В настоящее время подводная сварка широко используется при строительстве и обслуживании подводных газопроводов, гарантирующих бесперебойные поставки углеводородов. За последнее десятилетие с участием России реализован ряд крупнейших инфраструктурных объектов для транспортировки энергоносителей.

1) *Северный поток 1*. Соединяет российский Выборг и город Любмин в Германии по дну Балтийского моря. Технические характеристики: протяженность – 1124 км, мощность – 55 млрд м³ в год.

2) *Северный поток 2*. Соединяет Усть-Лугу (Россия) и Грайфсвальд (Германия) по дну Балтийского моря. Технические характеристики: протяженность – 1230 км, мощность – 55 млрд м³ в год.

3) *Джубга–Лазаревское–Сочи*. Трасса газопровода проходит по дну Чёрного моря вдоль прибрежной полосы (на расстоянии примерно 4,5 км от берега, на глубинах до 80 м). Технические характеристики: протяженность – 177 км, проектная мощность – 3,8 млрд м³ в год.

4) *Турецкий поток*. Соединяет Краснодарский край и европейскую часть Турции. Технические характеристики: протяжённость трубопровода составила около 1100 км, из них 910 км – подводная часть, состоит из двух ниток суммарной мощностью 31,5 млрд м³.

Дополнительно планируется реализовать ряд не менее масштабных проектов, таких как East Med. Протяженность газопровода составит 2100 км, максимальная глубина строительства – 3000 м и др. Перечисленные факты подтверждают активное освоение Мирового океана и прибрежного шельфа, в частности по добыче углеводородов со дна морей и созданию трубопроводных сетей по их транспортировке. Для выполнения этих работ применяют различные способы подводной сварки и резки металлов [2].

В связи с вышесказанным очевиден нарастающий спрос на производство работ по подводной сварке, связанной с обслуживанием и своевременным ремонтом инфраструктуры подводных газопроводов. Неотъемлемым атрибутом производства работ по подводной сварке является формирование твердых частиц [6]. Для своевременного анализа антропогенной нагрузки на морские экосистемы необходимо тщательно и всесторонне изучить морфометрические характеристики твердых частиц, сформированных при подводной сварке. Данная работа посвящена морфологическому анализу твердых частиц подводной сварки для двух наиболее распространённых технологических процессов.

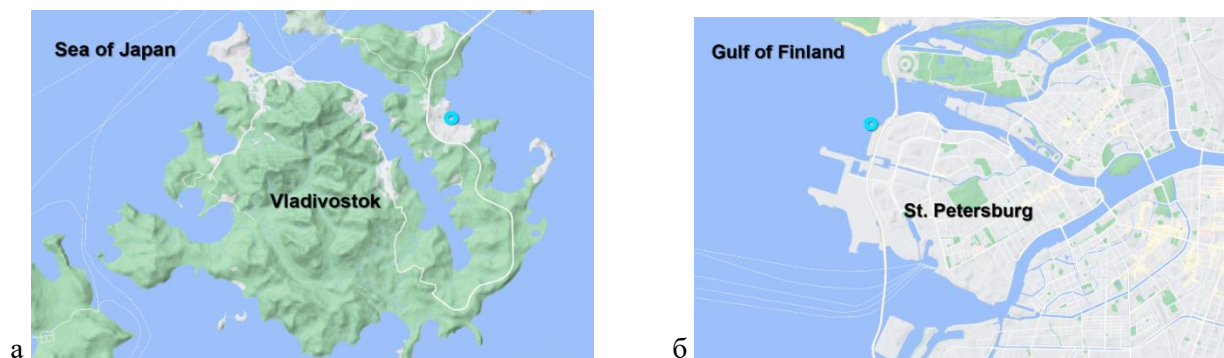
Материалы и методы

Пробы частиц отбирались для двух технологических процессов (рис. 1, 2):

1) при использовании электродов Arcair size 5/16X14(8,0 x 356 мм) cat.no.:42-059-007.

Для данного эксперимента пробы воды отбирались в бухте Аякс (Японское море);

2) при использовании специальной сварочной проволоки порошковой наплавочной ППС-АПЛ2 D-1,6 мм (ТУ 1274-001-83763787), скорость – 265 мм/мин. Пробы воды были взяты из акватории Финского залива (Балтийское море).



**Рис. 1. Расположение точек отбора проб морской воды:
а – б. Аякс, Японское море; б – Финский залив, Балтийское море**

Время горения дуги подводной сварки – 1 мин. Время забора проб – после наплавки. Сделано два валика по 100 мм.

Образцы наночастиц отмывали от морской воды, применяя последовательное осаждение на центрифуге, добавление дистиллированной воды и ресуспендирование. Процедуру повторяли 20 раз. Полученный осадок однократно отмывали этанолом и далее снова дистиллятом.

Для исследования выделенных наночастиц их суспензии объемом 10 мкл помещали на медную сеточку, покрытую формваровой пленкой, после чего высушивали при комнатной температуре. Микроанализ с помощью EDS выполняли с помощью детектора (Oxford Instruments Inca X-Max 8 мм²; Абингдон, Оксфордшир, Великобритания), соединенного с вакуумной камерой аналитического просвечивающего электронного микроскопа (JEM 2100, JEOL, Токио, Япония) с программным обеспечением Inca (Oxford Instruments, Абингдон, Оксфордшир, Великобритания). Время накопления спектров составляло 300 с.

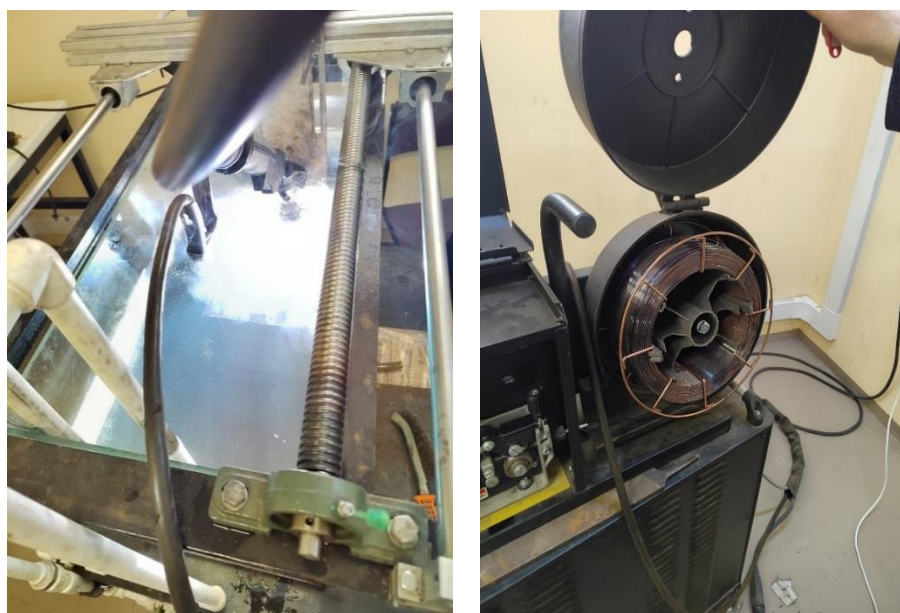


Рис. 2. Внешний вид стенда для подводной сварки

Результаты

Электрод. Японское море

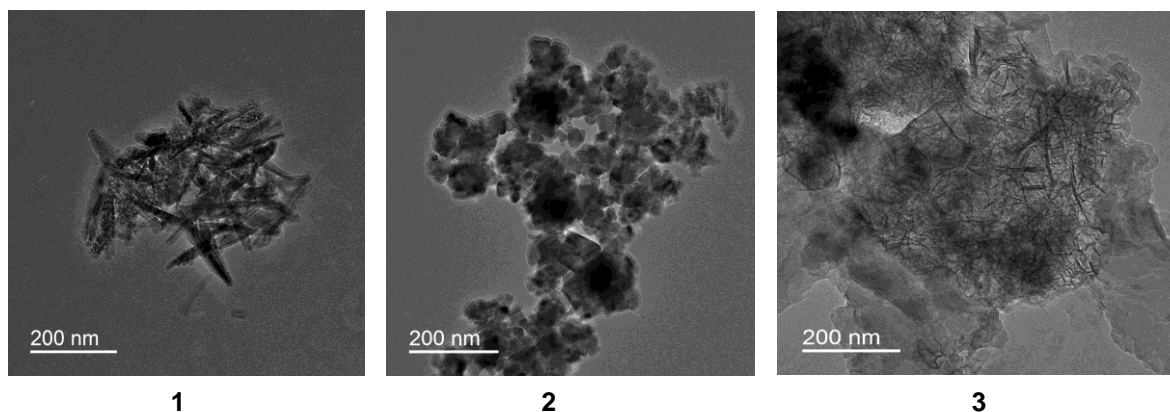


Рис. 3. Типы морфологического строения для частиц при использовании электрода: 1 – остроугольные (цитотоксичны); 2 – округлые (формируют агломераты); 3 – пленочные

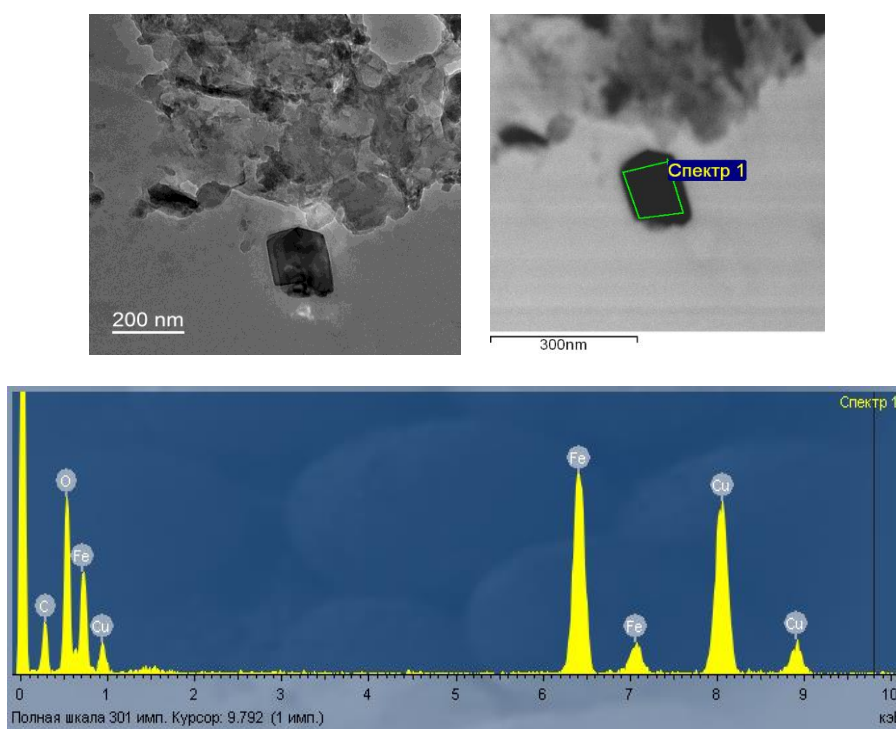


Рис. 4. Точка 1, спектр 1

Результаты определения концентрации элементов в морской воде, мкг/л (ppb)

Определение концентраций химических элементов выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре для каждой точки. Для спектра 1 выявлен следующий химический состав элементов (табл. 1). Частицы представляют собой оксиды металлов (Cu, Fe).

Таблица 1

Результат спектрального анализа 1 (электрод)

Наименование	Fe	Cu	C	O	Минеральная составляющая
% содержания	8,391	19,526	0,525	0,277	71,281

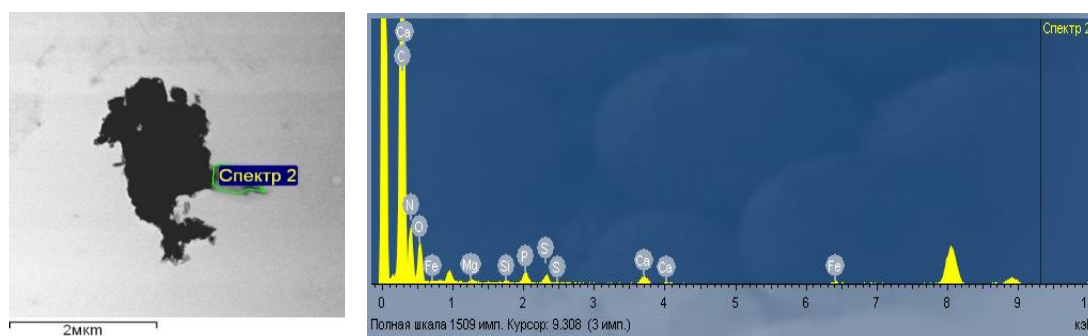


Рис. 5. Точка 2, спектр 2

Для спектра 2 выявлен более богатый химический состав элементов (табл. 2): добавились Si, Mg, Ca, S, P и отсутствует Cu по сравнению со спектром 1. Среди примесных элементов наибольшее содержание выявлено для кальция.

Таблица 2

Результат спектрального анализа 2 (электрод)

Наименование	Fe	P	C	O	S	Mg	N	Ca	Si	Минеральная составляющая
% содержания	14,795	2,139	0,277	0,525	4,772	1,254	0,392	8,352	1,74	65,754

В целом химический состав твердых частиц подводной сварки, сформированных при использовании электродов, представлен несколькими основными элементами металлов: Fe, Cu и незначительным количеством примесных элементов (Mg, Si, P, Ca). Следует отметить незначительное содержание кислорода и углерода в рассматриваемых пробах (рис. 6).

Проволока. Балтийское море

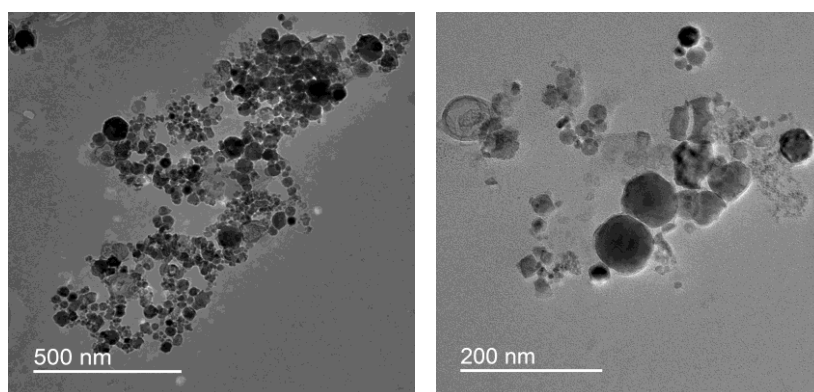


Рис. 6. Типы морфологического строения для частиц при использовании проволоки: глобулярные (формируют агломераты)

Ключевое отличие морфологического строения твердых частиц, сформированных при производстве работ по подводной сварке специальной проволокой, заключается в том, что все частицы имеют ярковыраженное глобулярное строение и в процессе микроскопического анализа не было выявлено остроугольных частиц или частиц иной формы. Сферические частицы отличаются лишь геометрическими параметрами, имея различный диаметр. Агломераты, сформированные данными твердыми частицами, менее плотные и могут в процессе динамического воздействия потоков воды вновь рассыпаться на первичные частицы (рис. 6).

Спектральный анализ частиц, сформированных при использовании в подводной сварке специальной проволоки, выявил преобладание металлов Fe, Ti и высокое содержание примесных элементов Mn, Ca, Al (рис. 7, табл. 3).

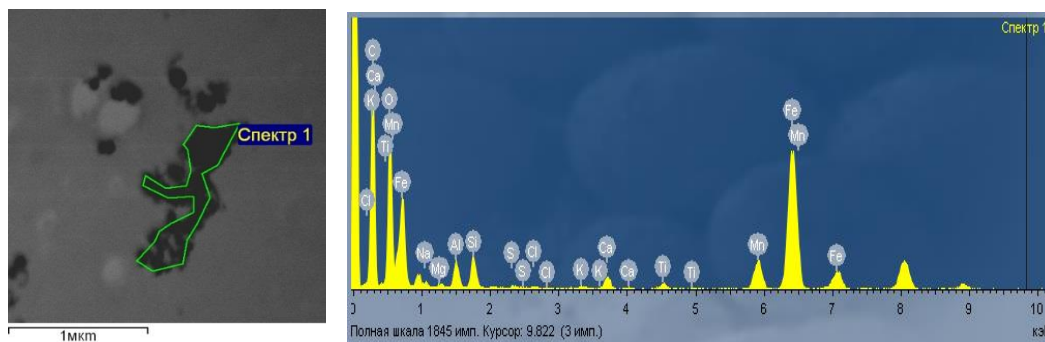


Рис. 7. Точка 1, спектр 1

Таблица 3

Результат спектрального анализа 1 (проволока)

Наименование	Fe	Ti	C	O	Al	Mn	Ca	Минеральная составляющая
% содержания	15,836	10,296	0,277	0,525	1,487	13,593	8,352	49,634

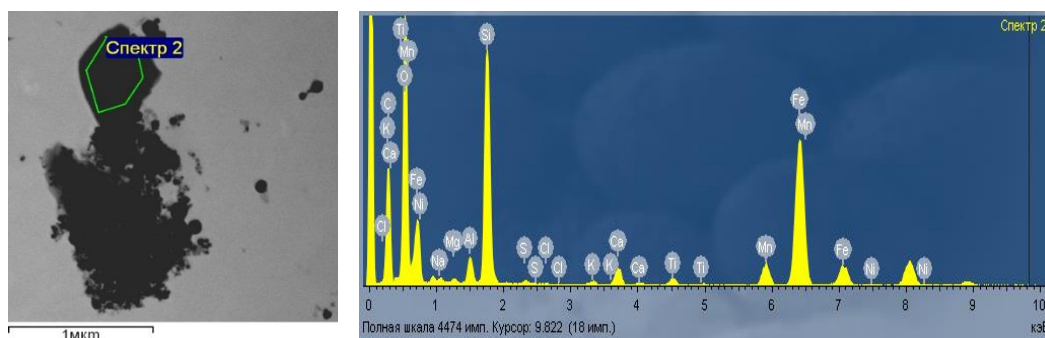


Рис. 8. Точка 2, спектр 2

Для спектра 2 отличительной особенностью является наличие в составе химического элемента: Co, который встречается лишь в этой точке спектрального анализа (рис. 8, табл. 4). Как известно [11, 12], тяжёлые металлы являются серьёзным загрязнителем окружающей среды, которая в местах активного антропогенного воздействия оказывает дополнительную нагрузку на устойчивость морских экосистем.

Таблица 4

Результат спектрального анализа 2 (проволока)

Наименование	Fe	Co	C	O	Si	Минеральная составляющая
% содержания	14,795	16,728	0,277	0,525	1,74	65,935

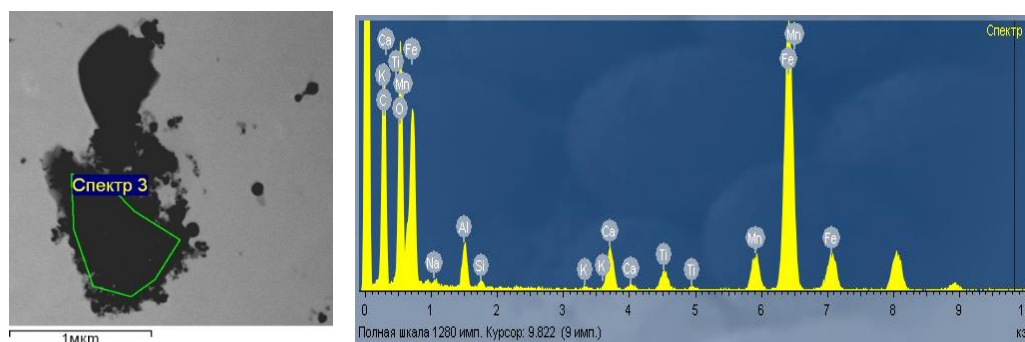


Рис. 9. Точка 3, спектр 3

По сути, произведен спектральный анализ двух половин одного агломерата частиц. Ключевым различием спектров 2 и 3 является наиболее богатый набор элементов для спектра 3 среди всех рассматриваемых в данной работе (табл. 5). Данный факт свидетельствует о том, что, даже находясь в одном агломерате, частицы имеют разный химический состав и соответственно способны оказывать различное воздействие на живые организмы и окружающую среду. В данной пробе кроме металлов Fe, Ti, Mn, Mg, Al выявлено высокое содержание и минорных компонентов: Ca, P, S, K (рис. 9).

Результат спектрального анализа 3 (проволока)

Таблица 5

Наименование	Fe	Ti	C	O	Si	Al	Mg	Mn	Na	Ca	Cl	K	S	P	Минер. Состав
% содержания	14,8	10,3	0,3	0,5	1,7	1,5	1,3	13,6	1,0	8,4	5,6	7,2	4,8	4,2	24,9

Обсуждение результатов

Анализ морфологического состава частиц подводной сварки при использовании специальных электродов выявил три основных типа строения твердых частиц (рис. 3):

- остроугольные наночастицы. Представляют наибольшую опасность для живых организмов из-за повышенных цитотоксичных качеств. Острые края частиц при проникновении вглубь живых организмов способны наносить значительный ущерб, повреждая внутренние органы пищеварительной, кровеносной и других систем живых организмов [3, 9];

- конгломераты округлой формы. Сформированы первичными частицами нано-диапазона, которые, слипаясь краями, формируют довольно крупные, размером до нескольких микрометров, агломераты частиц. Данные агломераты представляют собой практически единую крупную частицу из-за очень плотного примыкания первичных частиц. Очевидно, проникающая способность крупных агломератов значительно уступает более мелким и остроугольным частицам;

- пленки. Данные частицы предположительно сформированы при высыхании воды по причине оседания более плотных частиц на внутренние стенки пробоотборника. При производстве работ по подводной сварке в открытой среде данные частицы выпадают в осадок, оказывая воздействия на нижний бентосный слой морских акваторий.

Спектральный анализ выявил высокое содержание минорных компонентов (Mn, K, Ca, Na, Cl) и традиционные оксиды металлов, которые составляют основу твердых частиц и для традиционной электродуговой сварки [7, 8]. Низкое содержание кислорода свидетельствует о том, что частицы скорее неоксидные по составу; вероятно, это комплексные минеральные соединения, подтвердить это можно, например, рентгенофлуоресцентным или термическим анализом. Подобные исследования планируется проводить в будущем. Приведенные здесь результаты спектрального анализа отличаются количественными характеристиками представленных элементов; набор химических элементов для отобранных проб одинаков.

Заключение

Проанализированы два типа проб подводной сварки, различающихся применяемыми материалами (электрод и проволока) и морской средой (Японское и Балтийское море соответственно). Выявлено разнородное морфологическое строение частиц при проведении работ по подводной сварке с электродами, для них выявлено преобладание твердых частиц остроугольной формы и пленочного строения. Для твердых частиц подводной сварки, полученных при использовании проволоки, характерно глобулярное строение частиц, которые, слипаясь, формируют многочисленные агрегаты.

Набор химических элементов при использовании специальной проволоки для подводной сварки значительно шире по сравнению с частицами, сформированными при использовании электродов. Например, появляются в существенных дозах минорные компоненты (Mn, K, Na, Cl и др.), которые не были выявлены при спектральном анализе проб с использованием электродов. Это отличие может быть связано с химическим составом используемых при эксперименте материалов.

Работа с данными пробами будет продолжена в области оценки токсикологического воздействия твердых частиц на живые тест-объекты, а именно на представителей морской биоты и гидробионтов. Именно такие виды оказываются под воздействием техногенных частиц подводной сварки, которая способна оказывать токсикологическое влияние на живые организмы [10, 5].

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ЦКП ДВФУ и ЦКП ДВГИ за предоставленное научное оборудование и выражают признательность специалистам СибНСХБ – филиала ФГБУН ГПНТБ за помощь при работе с литературой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-24-01169 «Изучение влияния производных компонентов подводной сварки на гидробионтов».

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кононенко В.Я. Гипербарическая сухая подводная сварка (обзор) // Производственный раздел. 2008. Вып. 4. С. 44–50.
2. Мадатов Н.М. Сварка и резка металлов под водой. Москва: Машиностроение, 1975. 47 с.
3. Чашин М.В., Эллегсон Д.Г., Кабушка Я.С., Селдефлот И., Томассен И., Чашин В.П. Сварочный аэрозоль как фактор риска развития болезней органов кровообращения // Здоровье населения и среда обитания. 2013. № 5(242). С. 14–15.
4. Шестаков С.А. Подводная сварка и резка металлоконструкций морских нефтегазовых сооружений. Волгоград: ВолГАСУ, 2008. 164 с.
5. Häder D.-P., Erzinger G.S. Daphniatox – Online monitoring of aquatic pollution and toxic substances. *Chemosphere*. 2017;167:228–235. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.09.155
6. Kirichenko K.Y., Pikula K.S., Zakharenko A.M., Gridasov A.V., Parshin S.G., Medvedev S.A., Vakhniuk I.A., Golokhvast K.S. Ecotoxicological assessment of underwater welding impact during the construction of marine pipelines. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. Litvinenko V. (eds). Taylor & Francis Group, London, 2021. P. 222–230. URL: https://www-researchgate.net/publication/347652712_Ecotoxicological_assessment_of_underwater_welding_impact_during_the_construction_of_marine_pipelines – 30.08.2022.
7. Kirichenko K.Yu., Drozd V.A., Chaika V.V., Gridasov A.V., Kholodov A.S., Karabtsov A.A., Golokhvast K.S. Nano- and microparticles in welding aerosol: electronic and microscopic analysis. *Physics Procedia*. 2017;86:54–60. DOI: 10.1016/j.phpro.2017.01.019
8. Kirichenko K.Y., Kazarin O.A., Gridasov A.V., Kosyanov D.Y., Karabtsov A.A., Golokhvast K.S. The influence of electrode coating type on key parameters of PM10 fraction of the welding aerosol. *AIP Conference Proceedings*. 2017;1874:040017. DOI: 10.1063/1.4998090
9. Krabbe J., Esser A., Kanzler S., Braunschweig T., Kintsler S., Spillner J. et. al. The effects of zinc- and copper-containing welding fumes on murine, rat and human precision-cut lung slices. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2018;49:192–201. DOI: 10.1016/j.jtemb.2018.03.008
10. Mu Y., Wang Z., Wu F., Zhong B., Yang M., Sun F., Feng C., Jin X., Leung K.M.Y., Giesy J.P. Model for Predicting Toxicities of Metals and Metalloids in Coastal Marine Environments Worldwide. *Environmental Science and Technology*. 2018;52(7):4199–4206. DOI: 10.1021/acs.est.7b06654
11. Reale L., Ferranti F., Mantilacci S., Corboli M., Aversa S., Landucci F., Baldisserotto C., Ferroni L., Pancaldi S., Venanzoni R. Cyto-histological and morpho-physiological responses of common duck-

- weed (*Lemna minor* L.) to chromium. *Chemosphere*. 2016;145:98–105. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.11.047
12. Yin J., Wang A.-P., Li W.-F., Shi R., Jin H.-T., Wei J.-F. Time-response characteristic and potential biomarker identification of heavy metal induced toxicity in zebrafish. *Fish and Shellfish Immunology*. 2018;72:309–317. DOI: 10.1016/j.fsi.2017.10.047

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 4/53

Water Supply, Building Systems for Water Resources Protection

www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/102-111>

Kirichenko K., Chernousov V., Vakhnyuk I., Parshin S., Masyutin A., Gridasov A., Pogodaev A., Pikula K., Golokhvast K.

KONSTANTIN Yu. KIRICHENKO, Candidate of Biological Sciences, Researcher,

REC Nanotechnology, kirichenko@sfsca.ru

Far Eastern Federal University,

Vladivostok, Russia

Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences,

Krasnoobsk, Russia

VLADIMIR A. CHERNOUSOV, Researcher, chernousov@sfsca.ru

IGOR A. VAKHNYUK, Junior Researcher of the Information Support Sector of SibIME,

vakhniuk@sfsca.ru

KIRILL S. GOLOKHAVAST, Doctor of Biological Sciences, Professor,

Chief Researcher of the Laboratory of Toxicology and Pesticides, golokhvast@sfsca.ru,

Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences,

Krasnoobsk, Russia

SERGEY G. PARSHIN, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Higher School

of Physics and Technology of Materials, parshin@spbstu.ru

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Saint-Petersburg, Russia

ALEKSANDR G. MASYUTIN, Candidate of Biological Sciences, Researcher, Laboratory

of Histology, Department of Cell Biology and Histology, imber.acidis@gmail.com,

<http://orcid.org/0000-0002-8067-4261>

Moscow State University named after M.V. Lomonosov

Moscow, Russia

ALEKSANDR V. GRIDASOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

Director of the Industrial Safety Department, gridasov.av@dvfu.ru

ANTON V. POGODAEV, Senior Lecturer, Director of the Competence Center in the Field

of Materials Testing of the Department of Industrial Safety, pogodaev.av@dvfu.ru

Polytechnic Institute

KONSTANTIN S. PIKULA, Candidate of Biological Sciences, Assistant of the Department

of Oil and Gas Technologies and Petrochemistry, pikula_ks@dvfu.ru

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Study of the morphological composition of particles in water samples during underwater welding

Abstract. This work is devoted to the study of the morphological structure of solid particles formed during underwater welding. Particles formed in two different technological processes are considered: when using electrodes and when using wire. The formed solid particles of underwater welding have a heterogeneous shape, the most common types are presented, for which a spectral analysis has been performed.

Keywords: underwater welding, nano- and microparticles, ecology

For citation: Kirichenko K., Chernousov V., Vakhnyuk I., Parshin S., Masyutin A., Gridasov A., Pogodaev A., Pikula K., Golokhvast K. Study of the morphological composition of particles in water samples during underwater welding. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):102–111. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Kononenko V.Ya. Hyperbaric dry underwater welding (Review). *Production section*. 2008;(4):44–50. (In Russ.)
2. Madatov N.M. Welding and cutting of metals under water. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 47 p. (In Russ.)
3. Chashchin M.V., Ellegson D.G., Kabushka Ya.S. Welding aerosol as a risk factor for the development of circulatory diseases. *Population health and habitat*. 2013;(5):14–15. (In Russ.)
4. Shestakov S.A. Underwater welding and cutting of metal structures of offshore oil and gas facilities. Volgograd, VolGASU, 2008. 164 p. (In Russ.)
5. Häder D.-P., Erzinger G.S. Daphniatox – Online monitoring of aquatic pollution and toxic substances. *Chemosphere*. 2017;167:228–235. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.09.155.
6. Kirichenko K.Y., Pikula K.S., Zakharenko A.M., Gridasov A.V., Parshin S.G., Medvedev S.A., Vakhniuk I.A., Golokhvast K.S. Ecotoxicological assessment of underwater welding impact during the construction of marine pipelines. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. Litvinenko V. (eds). Taylor & Francis Group, London, 2021. P. 222–230. URL: https://www-researchgate.net/publication/347652712_Ecotoxicological_assessment_of_underwater_welding_impact_during_the_construction_of_marine_pipelines – 30.08.2022.
7. Kirichenko K.Yu., Drozd V.A., Chaika V.V., Gridasov A.V., Kholodov A.S., Karabtsov A.A., Golokhvast K.S. Nano- and microparticles in welding aerosol: electronic and microscopic analysis. *Physics Procedia*. 2017;86:54–60. DOI: 10.1016/j.phpro.2017.01.019
8. Kirichenko K.Y., Kazarin O.A., Gridasov A.V., Kosyanov D.Y., Karabtsov A.A., Golokhvast K.S. The influence of electrode coating type on key parameters of PM10 fraction of the welding aerosol. *AIP Conference Proceedings*. 2017;1874:040017. DOI: 10.1063/1.4998090
9. Krabbe J., Esser A., Kanzler S., Braunschweig T., Kintsler S., Spillner J. et. al. The effects of zinc- and copper-containing welding fumes on murine, rat and human precision-cut lung slices. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2018;49:192–201. DOI:10.1016/j.jtemb.2018.03.008
10. Mu Y., Wang Z., Wu F., Zhong B., Yang M., Sun F., Feng C., Jin X., Leung K.M.Y., Giesy J.P. Model for Predicting Toxicities of Metals and Metalloids in Coastal Marine Environments Worldwide. *Environmental Science and Technology*. 2018;52(7):4199–4206 DOI:10.1021/acs.est.7b06654
11. Reale L., Ferranti F., Mantilacci S., Corboli M., Aversa S., Landucci F., Baldisserotto C., Ferroni L., Pancaldi S., Venanzoni R. Cyto-histological and morpho-physiological responses of common duckweed (*Lemna minor* L.) to chromium. *Chemosphere*. 2016;145:98–105. DOI:10.1016/j.chemosphere.2015.11.047
12. Yin J., Wang A.-P., Li W.-F., Shi R., Jin H.-T., Wei J.-F. Time-response characteristic and potential biomarker identification of heavy metal induced toxicity in zebrafish. *Fish and Shellfish Immunology*. 2018;72:309–317. DOI: 10.1016/j.fsi.2017.10.047

Строительные конструкции, здания и сооружения

Научная статья

УДК 69.05

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/112-122>

Д.Г. Бобов, Н.И. Красильников, Ч.С. Гусейнов

БОБОВ ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ – главный специалист по проектированию и строительству, dmitry_bobov@mail.ru

КРАСИЛЬНИКОВ НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ – ведущий инженер по инновационным продуктам, nikolay.krasilnikov@bimeister.com

ООО «Бимэистер»

ГУСЕЙНОВ ЧИНГИЗ САИБОВИЧ – д.т.н., профессор, guseinov2@yandex.ru

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
Москва, Россия

Оценка потенциального уровня автоматизации строительных журналов при ведении их в электронном виде

Аннотация. Во время обоснования целесообразности перехода к электронным строительным журналам мы столкнулись с отсутствием эмпирической оценки ожидаемого уровня автоматизации. В результате анализа действующих нормативов по ведению строительных журналов, актов освидетельствования скрытых работ, а также предписаний строительного контроля составлены принципиальная схема и правила формирования строительных журналов в электронном виде. Результаты настоящей статьи предполагают двукратное сокращение трудоёмкости ведения строительных журналов. Дополнительно рассмотрены вопросы, которые влияют на достижение полученного уровня уменьшения трудоёмкости. Им стоит уделять повышенное внимание на этапе подготовки, чтобы дальнейшая цифровизация процессов привела к успеху и не свелась к убыточному проекту.

Ключевые слова: автоматизация строительных журналов, информационные системы, проблемы цифровизации строительства

Для цитирования: Бобов Д.Г., Красильников Н.И., Гусейнов Ч.С. Оценка потенциального уровня автоматизации строительных журналов при ведении их в электронном виде // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 112–122.

Введение

Проблемы ведения строительных журналов (общего журнала работ, журнала авторского надзора и других специальных журналов) на бумажном носителе в рукописном виде широко известны и подробно рассмотрены в работах А.С. Карпушкина [1], К.С. Петрова [3] и Н.В. Цопа [6], где перечислены следующие проблемы:

- высокая ежедневная трудоёмкость;
- запрет на внесение изменений (замазывание, зачеркивание);
- необходимость ведения чернового и чистового журналов;
- отсутствие инструментов автоматизации;
- расплывчатые указания и невнятные требования к заполнению;
- риск порчи или утери;
- высокая трудоёмкость анализа хода строительства;
- сложность в сопоставлении записей между журналами;
- возможность внесения записей постфактум;
- возможность фальсификации записей Подрядчиком и ряд других.

Решить возникающие проблемы призваны информационные системы, основанные на технологии информационного моделирования, которая широко используется за рубежом [7, 8]. В последние годы в России приняты постановления и стандарты, регламентирующие ведение цифровых информационных моделей^{1, 2}. Так, в 2022 г. принят стандарт³, который допускает ведение общего и специальных журналов в электронном виде.

В течение нескольких лет ведётся активная разработка информационных систем, в том числе для ведения строительных журналов и исполнительной документации в электронном виде. Компания «Бимэстер» также занимается разработкой информационной системы «Vime-ister», основанной на технологии информационного моделирования.

В приведенных выше материалах отмечаются качественные эффекты перехода к ведению журналов в электронном виде, но упускают количественные показатели, которые бы наглядно показали, насколько можно уменьшить трудоёмкость заполнения журналов при их ведении в электронном виде.

В данной работе поставлена цель – определить потенциальный уровень автоматизации строительных журналов при их ведении в электронном виде. Для этого поставлены следующие задачи:

- 1 – установить правила хранения сопроводительной документации;
- 2 – сформулировать правила и требования ведения справочников;
- 3 – составить принципиальную схему формирования строительных журналов;
- 4 – определить правила заполнения полей журналов;
- 5 – показать потенциальный уровень автоматизации.

Известно около 100 видов строительных журналов, а также множество связанных с ними документов, которые должны быть учтены при анализе. Для анализа в работе использованы следующие документы:

- 1 – общий журнал работ⁴ (ОЖР);
- 2 – журнал авторского надзора⁵ (ЖАН);
- 3 – журнал входного контроля⁶;
- 4 – акт освидетельствования скрытых работ⁷ (АОСР);
- 5 – журнал сварочных работ⁸;
- 6 – журнал бетонных работ⁸;
- 7 – акт оценки прочности монолитных конструкций⁸;
- 8 – журнал антикоррозионной защиты сварных соединений⁸;
- 9 – форма предписания строительного контроля⁹;
- 10 – журнал монтажа строительных конструкций¹⁰;
- 11 – акт об устранении нарушений¹¹;
- 12 – типовый договор подряда;
- 13 – свидетельство о государственной регистрации юридического лица;
- 14 – разрешение на строительство;
- 15 – положительное заключение экспертизы проектной документации;

¹ Постановление Правительства № 1431 от 15.09.2020.

² СП 333.1325800.2020 Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла.

³ ГОСТ Р 70108-2022 Документация исполнительная. Формирование и ведение в электронном виде.

⁴ Федеральный закон № 7 от 12.01.2007 «Об утверждении и введении в действие Порядка ведения общего и (или) специального журнала учёта выполнения работ при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте объектов капитального строительства».

⁵ СП 246.1325800.2016 Положение об авторском надзоре за строительством зданий и сооружений.

⁶ ГОСТ 24297-2013 Верификация закупленной продукции. Организация проведения и методы контроля.

⁷ РД 11-02-2006 Требования к составу и порядку ведения исполнительной документации при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте объектов капитального строительства и требования, предъявляемые к актам освидетельствования работ, конструкций, участков сетей инженерно-технического обеспечения. Актуальная версия от 09.11.2017, приказ № 470.

⁸ Р-ССК-04-2016 Рекомендации о порядке ведения специальных журналов учёта выполнения работ при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте объектов капитального строительства. Актуальная версия по состоянию на 01.10.2018.

⁹ СП 48.13330.2019 Свод правил. Организация строительства. СНиП 12-01-2004. Актуальная версия от 24.12.2019, приказ № 861/пр. // п. 9.29, 9.33.

¹⁰ Р-ССК-04-2016 Рекомендации о порядке ведения специальных журналов учёта выполнения работ при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте объектов капитального строительства. Актуальная версия по состоянию на 01.10.2018.

¹¹ Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 14.07.2022). Ч. 7, ст. 53.

- 16 – типовые технические условия на подключение к сетям;
- 17 – приказы о назначении уполномоченных представителей.

Несмотря на значительные преимущества цифровых решений, большая их часть остаётся провальной. В 2020 г. Московская школа управления «Сколково» опубликовала материалы [5], в которых говорится о 70%-ном уровне неудачных проектов цифровизации. Причины этому следующие:

- 1 – преувеличение ценности разрабатываемой системы;
- 2 – отсутствие точного понимания области цифровизации, её влияния на сопутствующую деятельность и реальную ценность;
- 3 – ошибочное мнение о том, что цифровая трансформация означает полный пересмотр действующих технологий;
- 4 – массовое и единовременное внедрение цифровых решений;
- 5 – уверенность разработчиков в их большей осведомлённости о процессах, чем самих участников процесса;
- 6 – разработка систем с фокусом на продукт, а не на пользователей;
- 7 – отсутствие действительного устранения ручной и/или рутинной работы сотрудников.

На основе нашего опыта дополнительно рассмотрены аспекты, которым стоит уделять повышенное внимание на этапе подготовки, чтобы дальнейшая цифровизация строительного процесса оказалась успешной.

Организация хранения документации

В системе Vimeister для каждого электронного документа создаётся электронная карточка с определённым набором атрибутов (свойств). Свойства несут дополнительную информацию об электронном документе (номер документа, компания-разработчик, дата выпуска, статус документа и др.). Они имеют различные типы (дата, число, единица измерения, справочник и др.), что облегчает работу пользователей, расширяет возможности обработки и уменьшает нагрузку на систему во время их обработки, препятствуют вводу некорректных данных.

На рис. 1 показаны пример разрешения на строительство и его электронная карточка. Если электронный документ представляет собой «твёрдую копию», то есть понимаемую только пользователем, тогда пользователь системы самостоятельно заполняет атрибуты. Если электронный документ – машиночитаемый документ, то система способна самостоятельно по настроенным правилам заполнить атрибуты.

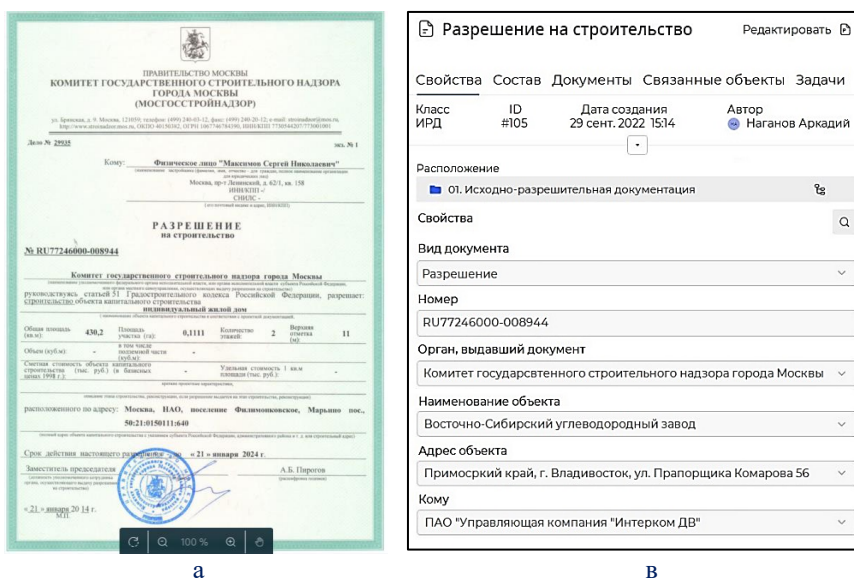


Рис. 1. Разрешение на строительство: а) электронный документ; б) электронная карточка

Для заполнения атрибутов в карточке могут использоваться значения из предварительно созданных справочников и классификаторов, принятых в компании или на отдельном

проекте. Также вводимые в свойства значения могут формировать самостоятельные справочники (рис. 2).

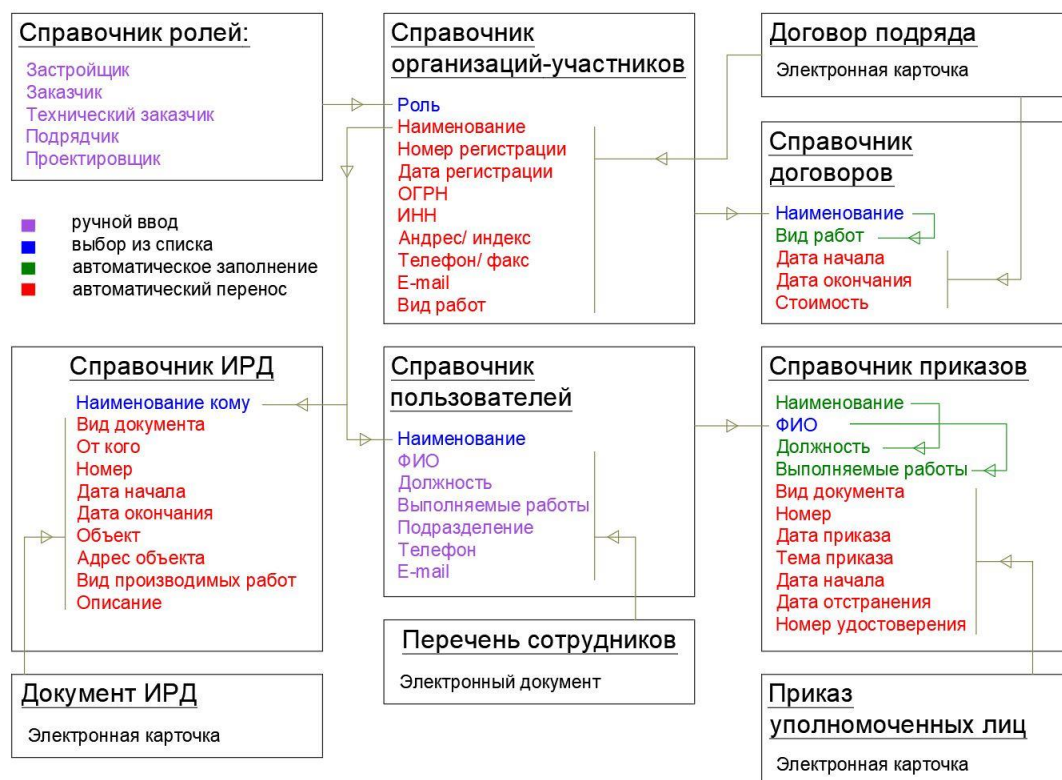


Рис. 2. Схема формирования справочников

Справочники являются ключевым инструментом автоматизации. Выбирая одно значение из справочника, система способна самостоятельно перенести связанные с этим значением дополнительные данные. Такой способ позволяет защитить пользователей системы от ошибок при вводе, выстроить четкую связь данных, проследить их перемещение, настроить массовое изменение и обеспечить своевременную трансляцию вводимых данных, сократить объём пользовательского ввода данных. На примере справочника приказов (см. рис. 2) видно, что пользователь выбирает ФИО сотрудника, а наименование компании, его должность и выполняемые им работы заполняются автоматически из связанного справочника пользователей.

Справочники представляют собой объёмные таблицы с множеством столбцов и строк (справочник организаций-участников). В отдельных случаях используются достаточно простые – плоские – справочники, в которых имеется один столбец с множеством строк (справочник ролей).

Анализ ведения строительных журналов

Анализ рассматриваемых документов показал большое количество дублирования данных. Так, для заполнения титульного листа общего журнала работ из разрешения на строительство берутся наименование объекта, его адрес и вид работ, из договоров подряда – данные о юридических лицах участников, из приказов уполномоченных лиц в ОЖР – данные привлекаемых специалистов и т.д. Аналогично поступают и с АОСР, ЖАН и другими документами. Чтобы понять объём ручного заполнения, в табл. 2 приведены количественные показатели полей (граф или столбцов для заполнения) по каждому документу.

Результаты анализа говорят о четырёхкратном потенциале уменьшения работы при автоматизации процессов ведения строительных журналов: четверть граф заполняется специалистами впервые, три четверти полей – это дублирование или перенос значений из ранее заполненных журналов.

Таблица 1

Количественный состав полей анализируемых документов

Наименование документа	Поля для заполнения		
	Всего	Первичный ввод	Перенос из других документов
Общий журнал работ	146	18	128
Журнал авторского надзора	39	7	32
Журнал входного контроля	16	7	9
Акт освидетельствования скрытых работ	61	3	58
Предписание	25	4	21
Акт об устранении нарушений	14	3	11
Журнал сварочных работ	45	9	36
Журнал бетонных работ	36	9	27
Акт оценки прочности монолитных конструкций	60	36	24
Журнал антикоррозионной защиты сварных соединений	35	9	26
Журнал монтажа строительных конструкций	40	7	33
ИТОГО:	517	106	405
	100%	22%	78%

Количество граф отражает состав полей в документах, но не количество записей в журнале, которых в сотни раз больше самих граф, а значит реальная трудоёмкость может уменьшиться ещё больше. К примеру, титульный лист общего журнала работ (ОЖР) включает 76 полей (перенос из других справочников) для заполнения и заполняется один раз. Раздел 3 ОЖР¹² включает в себя 9 полей (для каждой записи), из которых данные в 2 поля вводятся впервые а в 7 полей – переносятся из других документов. В то же время раздел 3 является основным, количество записей может достигать нескольких тысяч (до 10 000 полей).

Среди действующих нормативных актов и государственных стандартов нет единого документа, в котором были бы представлены правила или схема заполнения журналов и порядок переноса данных между ними. Отдельные стандарты описывают порядок ведения одного журнала и дают лишь ссылки на смежные стандарты.

С учетом указанных выше подходов к хранению документации и правил формирования и использования справочников составлена схема наполнения журналов и определены способы заполнения граф журналов, актов и предписания (табл. 2, рис. 3, 4).

Таблица 2

Состав и типы полей журналов

Наименование документа	Поля для заполнения					
	Всего	Ручной ввод	Не требуется	Автоматическое дублирование	Выбирается из других документов	Заполняется автоматически
Общий журнал работ	146	12	6	26	22	80
Журнал авторского надзора	39	7	-	2	8	22
Журнал входного контроля	16	7	-	2	3	4
Акт освидетельствования скрытых работ	61	3	-	9	11	38
Предписание	25	4	-	9	3	9
Акт об устранении нарушений	14	3	-	3	4	4

¹² Федеральный закон № 7 от 12.01.2007 «Об утверждении и введении в действие Порядка ведения общего и (или) специального журнала учёта выполнения работ при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте объектов капитального строительства».

Наименование документа	Поля для заполнения					
	Всего	Ручной ввод	Не требуется	Автоматическое дублирование	Выбирается из других документов	Заполняется автоматически
Журнал сварочных работ	45	9	-	-	15	21
Журнал бетонных работ	36	9	-	8	7	12
Акт оценки прочности монолитных конструкций, их 4 шт.	60	36	-	-	8	16
Журнал антикоррозионной защиты сварных соединений	35	9	-	-	15	11
Журнал монтажа строительных конструкций	40	7	-	-	12	21
ИТОГО:	517	106	6	59	108	238
	100%	21%	1%	11%	21%	46%

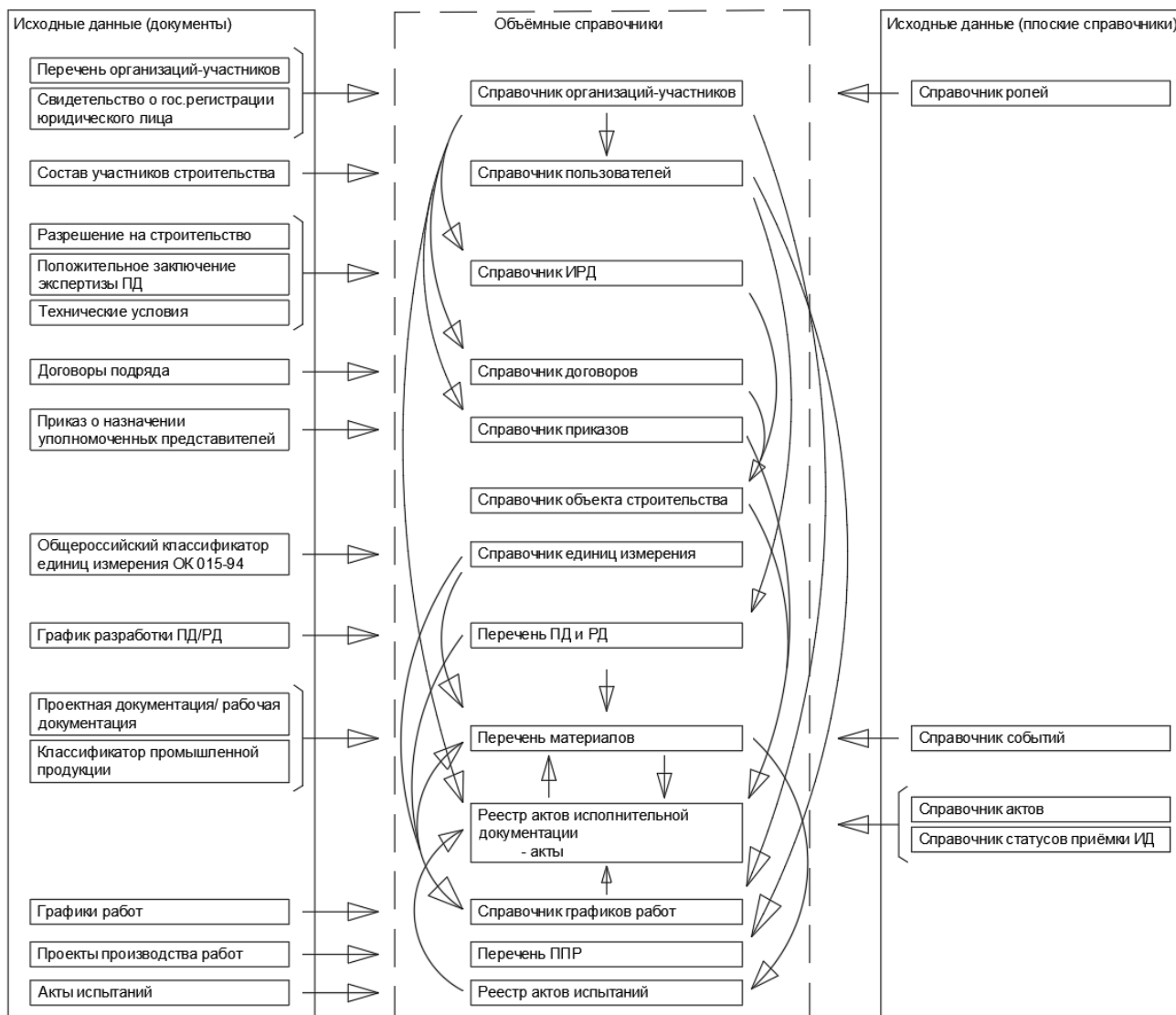


Рис. 3. Принципиальная схема формирования справочников

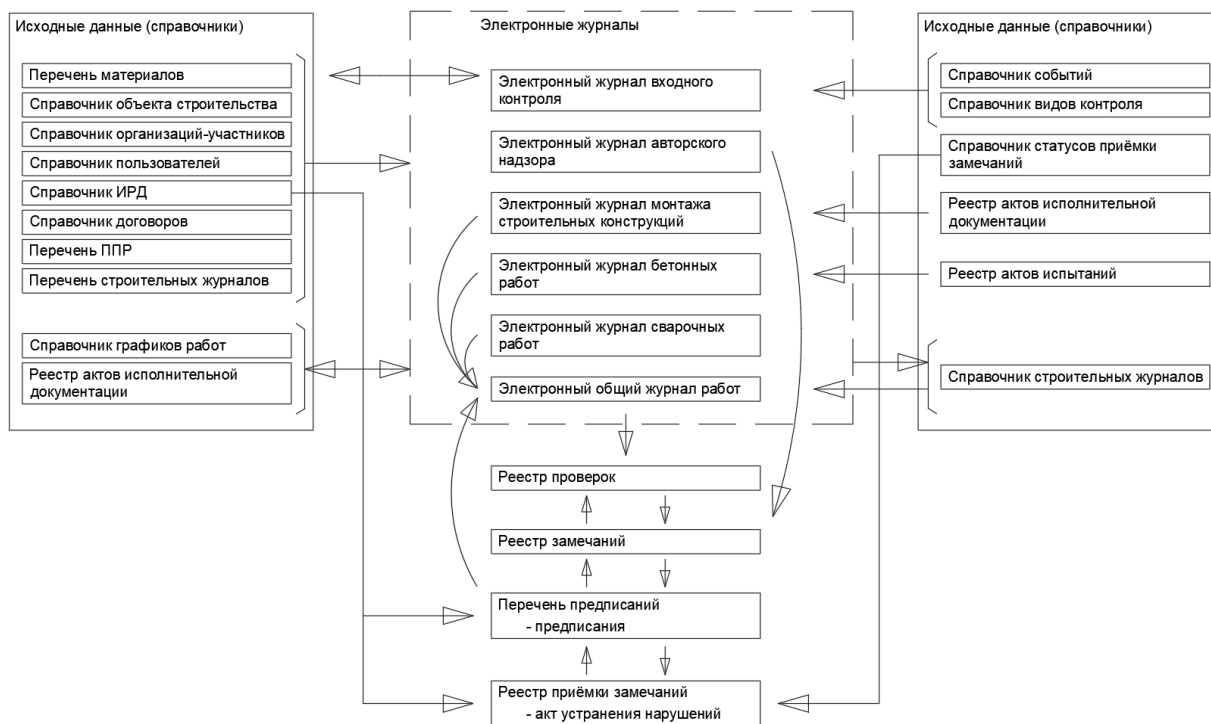


Рис. 4. Принципиальная схема формирования журналов

На рис. 3 и 4 показаны направления (одно- и двусторонние) перемещения данных из карточек документов и плоских справочников в объёмные справочники, которые служат для последующего формирования строительных журналов, актов и предписаний.

Плоские справочники представляют собой таблицу, состоящую из одного столбца данных-наименований. Так, в справочнике актов даются наименования актов, применяемых в проекте. Объёмные справочники представляют собой таблицу, состоящую из множества столбцов с данными. Например, в реестре актов исполнительной документации помимо наименования акта указываются вид работ, срок подписания, данные подписывающих лиц и др.

Представленные в табл. 3 количественные значения полей по каждому типу говорят о сокращении участия человека при формировании журналов на 57%, уменьшении трудоёмкости при заполнении благодаря вариантам выбора на 21%, и лишь 21% полей остаётся для ручного заполнения.

Полученный уровень уменьшения трудоёмкости достигается при наличии в информационной системе следующих функционалов:

- создание и ведение как плоских, так и объёмных справочников;
- настройка правил формирования справочников;
- настройка связанных справочников;
- назначение способов заполнения атрибутов: выбор из справочника, трансляция из атрибута в справочник, трансляция из одного атрибута в выбранный (один или несколько) атрибут, заполнение атрибутов через связанные справочники;
- подписание ЭЦП отдельных записей в графах с сохранением информации о ранее подписанных ЭЦП записях;
- автоматизированная проверка сроков поставок материалов со сроками выполнения работ и разработки ПД и РД (в целях выявления временных коллизий).

Помимо высоких функциональных требований существуют нефункциональные требования, которые затрагивают качество информационной системы, компетентность разработчиков, готовность заказчиков и их конечных пользователей.

Внедрение

Заказчики, особенно крупные, идут путём заказа разработки системы для каждого этапа жизненного цикла проекта капитального строительства у разных вендоров. Такой подход при-

водит к нарушению оптимальной последовательности внедрения и формированию множества разрозненных систем.

Оцифровка бизнес-процессов должна вестись так, чтобы полученные результаты были использованы в смежных процессах, иначе вы тратите свои средства и силы впустую. Так, в России уже широко используются системы для согласования проектно-технической документации, но мало эффективных отечественных систем для цифрового сопровождения строительства. Преимущества цифровых систем на этапе проектирования нивелируются ручным ведением строительных журналов, исполнительной документации и форм КС.

Одновременно с этим полагают, что переходить к оцифровке нужно постепенно, оцифровывая последовательно небольшие процессы. Это ошибочное мнение: оцифровке следует подвергать не один небольшой связанный с множеством других процессов, а комплекс процессов, имеющих наименьшее количество зависимостей. Такой подход позволяет контролировать вносимые в устоявшиеся процессы изменения, выявлять и оперативно устранять сбои и неэффективную работу. А готовый результат не потребует дополнительной доработки.

Формирование архитектуры из множества разрозненных систем ведёт к получению «зоопарка» программ, управление и работа с которыми вызывает серьезные сложности. Решить эту проблему берутся отечественные разработчики комплексных информационных систем (в том числе ГК «БимэЙстер»). Большинство компаний использует комплексный подход и предлагает масштабные системы, способные решить все потребности автоматизации. Это оправдано, так как данный подход защищает потенциальных клиентов от проблем при масштабировании (расширении). Мультипрограммная система – это своевременное обновление, множество интеграционных связей, повышенная зависимость от разных поставщиков, множество команд поддержки, сложность внедрения, высокая стоимость реконструкции (замены) и переноса (особенно сохранения) данных.

Однако при использовании одного вендора повышаются квалификационные требования к разработчикам, то есть они обязаны знать общие принципы и все тонкости работ, которые им предстоит оцифровывать. Необходимо погружать разработчиков ИТ-решений в бизнес-задачи конечных пользователей. Это позволит сместить акцент с разработки продукта на работу пользователей благодаря пониманию сотрудниками вендора действительных ценностей производимого продукта.

Традиционные формы против электронных

Особенность реализации строительных проектов в России в том, что многие правила и формы ведения документации (журналы, акты, КС и др.) закреплены в нормативных актах, сводах правил и стандартах, а отступление от них означает нарушение закона. Но другой причиной подобного отношения является значительное отступление от действующих правил и норм при автоматизации строительной отрасли. ИТ-компании разрабатывают цифровые системы с упором на продукт (ИТ-ландшафт), а не пользователей. Вследствие этого игнорируются традиционные формы документов, регламентированные действующим законодательством, и предлагаются для заполнения упрощенные формы в виде таблиц. На рис. 5 представлена форма электронного журнала в системе EXON модуль «Ехон.Стройконтроль» [4]. А на рис. 6 представлена традиционная форма журнала авторского надзора.

Электронные формы не учитывают группировку полей по разделам, не все поля отражаются в системе, а лишь минимально необходимые, без учета требований¹³, в которых сказано, что формы и порядок ведения документации в электронном виде должны соответствовать формам и порядку ведения документации в традиционном бумажном виде.

Фокус информационной системы смещен главным образом на саму систему и работу её компонентов, а не на удобства пользователей. Переход к новым формам должен быть постепенным, включая шаг за шагом новые правила и упрощая форму. Именно такой подход используется в решениях, разрабатываемых ГК «БимэЙстер».

¹³ ГОСТ Р 70108-2022 «Документация исполнительная. Формирование и ведение в электронном виде»

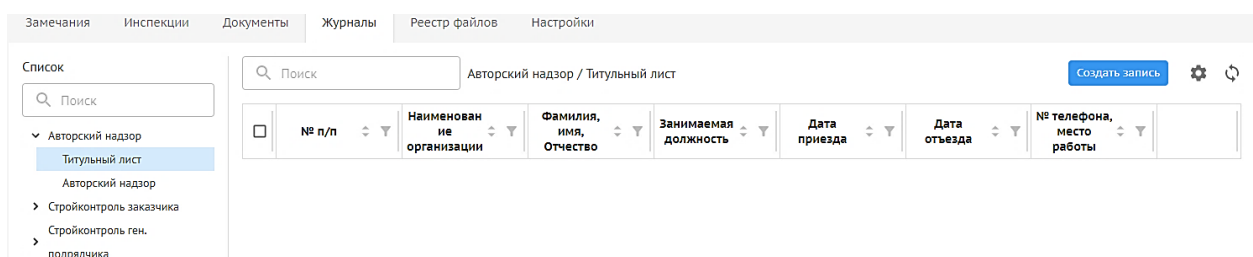


Рис. 5. Электронная форма журнала авторского надзора

ЖУРНАЛ АВТОРСКОГО НАДЗОРА ЗА СТРОИТЕЛЬСТВОМ
(СП 11-110-99, приложение А)

ПЕРЕЧЕНЬ ПОДРЯДНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ СТРОИТЕЛЬНЫЕ И МОНТАЖНЫЕ РАБОТЫ

Наименование объекта: Строительство котельной, расположенной по адресу: г. Санкт-
г. Санкт-Петербург, ул Исполнитель работ (генеральный подрядчик, подрядчик) ООО «Генподрядчик»

Адрес объекта строительства: г. Санкт-Петербург, ул Исполнители отдельных видов работ (субподрядчики):

Заказчик: ПАО «Инвестор»; 190136, г. Санкт-Петербур
(наименование работ - строительско-монтажная организация)

Проектировщик: ООО «Проектировщик»; 197162, г. Санкт-П
(наименование, адрес)

1. Земляные работы – ООО «Подрядчик»
2. Устройство оснований – ООО «Подрядчик»
3. Устройство монолитных железобетонных конструкций – ООО «Подрядчик»
4. Монтаж строительных конструкций – ООО «Подрядчик»
5. Монтаж дверных и оконных заполнений – ООО «Подрядчик»

СПИСОК СПЕЦИАЛИСТОВ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ АВТОРСКИЙ НАДЗОР

Фамилия, имя, отчество	Проектная организация, должность, № телефона	Вид работы, по которой осуществляется авторский надзор	Дата и № документа о полномочиях по проведению авторского надзора
1	2	3	4
<u>Воронов Александр Викторович</u>	<u>ООО «Проектировщик»; ГАП; (812) 793-53-27</u>	<u>ПС-0515СПБ ПС-0515СПБ/2 0515СПБ/2-КМ, ПС ГП</u>	
<u>Зайцев Артем Владимирович</u>	<u>ООО «Проектировщик»; ГИП; (812) 793-53-27</u>	<u>ПС-0515СПБ ПС-0515СПБ/2 0515СПБ/2-НВК, ПТМ, ПС-0515СПБ 0515СПБ/2-ГСВ, ПГ ГСН, ПС-0515СПБ 0515СПБ/2-ЭМ, ПС СС, ПС-0515СПБ 0515СПБ/2-А, ПС-Г</u>	

РЕГИСТРАЦИОННЫЙ ЛИСТ ПОСЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТА СПЕЦИАЛИСТАМИ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИМИ АВТОРСКИЙ НАДЗОР ЗА СТРОИТЕЛЬСТВОМ

Наименование организации	Фамилия, имя, отчество	Дата		Подпись представителя заказчика
		приезда	отъезда	
1	2	3	4	5
<u>ООО «Проектировщик»</u>	<u>Воронов Александр Викторович</u>	<u>01.04.2016</u>	<u>01.04.2016</u>	
<u>ООО «Проектировщик»</u>	<u>Воронов Александр Викторович</u>	<u>24.04.2016</u>	<u>24.04.2016</u>	

Рис. 6. Традиционная форма журнала авторского надзора

Готовность пользователей

Специалисты, ответственные за заполнение журнала, не воспринимают электронный журнал как эквивалент бумажного, понимая строгость проверки документов. Они наблюдают и контролируют заполнение, будучи уверенными, что документы и подписи не исчезнут из-за сбоя работы системы или сервера и что у них есть возможность заполнить журнал в удобное время, когда документ находится под рукой. Такое отношение является следствием работы на технически сложных и опасных объектах, где высока цена ошибки. Дополняет этот фактор значительный возраст специалистов, отвечающих за заполнение журналов.

Согласно ст. 55.5-1 ГрК РФ к ведению отчетной документации допускаются лица, состоящие в Национальном реестре специалистов (НРС). Для строителей это НРС НОСТРОЙ (Национальное объединение строителей), а для проектировщиков это НРС НОПРИЗ (Национальное объединение изыскателей и проектировщиков). Чтобы попасть в реестр, необходим опыт работы по направлению не менее 10 лет. Согласно данным [6], в 2019 г. средний возраст специалистов из реестра НРС составлял 48 лет: в возрасте до 50 лет – 58%, от 50 до 60 – 24% и свыше 60 лет – 18%.

Ответственные лица понимают необходимость использования современных инструментов, позволяющих оптимизировать и автоматизировать обработку информации и документов. Это понимают и органы стандартизации, и правительство Российской Федерации, вводя соответствующие нормативные акты: ПП № 331 от 05.03.2021; ПП № 1431 от 15.09.2021; СП 333.1325800.2020 и др. Указанные документы не отменяют действующие правила и формы ведения отчетной документации, но допускают её ведение в электронном виде, что повышает доверие конечных пользователей к информационным системам.

Заключение

Полученный в ходе оценки потенциальный уровень уменьшения трудозатрат специалистов более чем на 60% подтверждает необходимость перехода от бумажных журналов к электронным. Представленный в статье принцип формирования и ведения строительных журналов при помощи информационных технологий позволит повысить точность и скорость их заполнения, вести аналитику по различным критериям благодаря хранению данных в электронном виде, оперировать действительно оперативными, полными и достоверными данными для принятия решения.

Достигнуть полученного уровня автоматизации можно благодаря выполнению функциональных и нефункциональных требований. Функционал системы должен позволять работать: со справочниками (настраивать их форму, правила наполнения и взаимосвязи), атрибутами (настраивать способы их заполнения и передачу значений), электронной цифровой подписью (обеспечивать надежность и сохранность вносимых данных и юридическую значимость подписанных документов), календарно-сетевыми графиками (проверять в автоматическом режиме корректность сроков, выявляя временные коллизии). К нефункциональным требованиям относятся: компетентность команды разработчиков, которая должна понимать область, подлежащую оцифровке, и фокусироваться на пользователях, облегчая и упрощая их работу; соответствие электронных форм традиционным в части визуального исполнения и правил заполнения, то есть иметь минимальные отклонения на начальных этапах внедрения, чтобы пользователям было легче адаптироваться к новым условиям работы; соблюдение оптимального порядка внедрения, при котором не допускается сложностей «зоопарка систем» и результаты оцифрованных процессов используются, а не остаются без внимания. Нефункциональные требования не менее важны, чем функциональные требования.

Внедрение цифровых решений позволит накапливать достоверную и полную информацию об объектах капитального строительства. Анализ полученной в результате работы информации/данных – «бигдата» (BigData) – позволят сформировать совершенно новые методы ведения строительных работ, которые лягут в основу коренных изменений строительной отрасли.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Карпушкин А.С. Совершенствование формы и порядка ведения общего журнала работ в условиях цифровизации строительной отрасли // *Строительное производство*. 2022. № 2. С. 6–14.
2. Официальный сайт Exon. Облачная платформа для автоматизации и управления строительными процессами. URL: <https://exonproject.ru/> (дата обращения: 22.08.2022).
3. Петров К.С., Кузьмина В.А., Федорова К.В. Проблемы внедрения программных комплексов на основе технологий информационного моделирования (BIM-технологии) // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 2. С. 89.
4. Средний возраст специалистов НРС по организации строительства составляет 48 лет. Электронный журнал Правда о СРО. URL: <https://pravdaosro.ru/news/sredniy-voznrast-specialistov-nrs-ro-o/> (дата обращения: 21.07.2022).
5. Цифровые неудачники: почему диджитал-трансформации заканчиваются провалом? URL: <https://www.skolkovo.ru/expert-opinions/cifrovye-neudachniki-pochemu-didzhital-transformacii-zakanchivayutsya-provalom/> (дата обращения: 17.08.2022).
6. Цопа Н.В., Карпушкин А.С., Авакян А.К. О совершенствовании исполнительной документации в условиях цифровизации строительной отрасли // *Экономика строительства и природопользования*. 2021. № 2(79).
7. Sangyoo Ch., Kyungrai K., Yea-Sanf K. Generate-Select-Check Based Daily Reporting System. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2005;19(4). DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2005)19:4(412)
8. The next normal in construction. How disruption is reshaping the world's largest ecosystem. *McKinsey & Company Report*. July, 2020. URL: https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/capital%20projects%20and%20infrastructure/our%20insights/the%20next%20normal%20in%20construction/executive-summary_the-next-normal-in-construction.pdf – 26.10.2022.

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/112-122>

Bobov D., Krasilnikov N., Guseinov Ch.

DMITRIY G. BOBOV, Chief Specialist of Designing and Building, dmitry_bobov@mail.ru
 NIKOLAI I. KRASILNIKOV, Lead Specialist in Innovative Projects, krasilnikov@bimeister.com
 LLC *Bimeister*

Moscow, Russia

CHINGIZ S. GUSEINOV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, guseinov2@yandex.ru
 Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkin

Moscow, Russia

Assessment of the potential level of automation of construction logs when maintained in electronic form

Abstract. While justifying the feasibility of switching to electronic building logs, we were faced with the lack of an empirical assessment of the expected level of automation. As a result of the analysis of the current regulations on the maintenance of construction logs, certificates of inspection of hidden works, as well as regulations of construction control, a schematic diagram, and rules for the formation of construction logs in electronic form have been compiled. The results of this article note a twofold, potentially, reduction in the complexity of maintaining construction logs.

Additionally, we have considered issues that affect the achievement of the resulting level of labor intensity reduction. They should be given increased attention at the preparation stage so that further digitalization of processes will lead to success and not be reduced to a loss-making project.

Keywords: automation of construction log, information systems, the problems of digitalization in building

For citation: Bobov D., Krasilnikov N., Guseinov Ch. Assessment of the potential level of automation of construction logs when maintained in electronic form. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):112–122. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Karpushin A.S. Improving the form and procedure for maintaining a general journal of work in the conditions of digitalization of the construction industry. *Stroitelnoe proizvodstvo*. 2022;2:6–14. (In Russ.).
2. Official website Exon. Cloud platform for automation and management of construction processes. URL: <https://exonproject.ru/> – 22.08.2022. (In Russ.).
3. Petrov K.S., Kuzmina V.A., Fedorova K.V. Problems of implementation of software complexes based on information modeling technologies (BIM technologies). *Engineering Journal of Don*. 2017;(2):89. (In Russ.).
4. The average age of the NRS specialists in the organization of construction is 48 years. *Pravda o SRO*. URL: <https://pravdaosro.ru/news/sredniy-voznrast-specialistov-nrs-po-o/> – 21.07.2022. (In Russ.).
5. Digital Losers: Why Digital Transformations end in failure? URL: <https://www.skolkovo.ru/expert-opinions/cifrovye-neudachniki-pochemu-didzhital-transformacii-zakanchivayutsya-provalom/> – 17.08.2022. (In Russ.).
6. Tsopa N.V., Karpushin A.S., Avakyan A.K. On the improvement of executive documentation in the conditions of digitalization of the construction industry. *Ekonomika stroitelstva I prirodopolzovaniya*. 2021;(2):79. (In Russ.).
7. Sangyoo Ch., Kyungrai K., Yea-Sanf K. Generate-Select-Check Based Daily Reporting System. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2005;19(4). DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2005)19:4(412)
8. The next normal in construction. How disruption is reshaping the world's largest ecosystem. *McKinsey & Company Report*. Jule, 2020. URL: https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/capital%20projects%20and%20infrastructure/our%20insights/the%20next%20normal%20in%20construction/executive-summary_the-next-normal-in-construction.pdf – 26.10.2022.

Строительные конструкции, здания и сооружения

Научная статья
УДК 69.055, 69.001.5
<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/123-129>

Д.Е. Кардаш

КАРДАШ ДМИТРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ – старший научный сотрудник, dk600328@mail.ru
Научно-исследовательский институт (военно-системных исследований материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева
Санкт-Петербург, Россия

Частная методика оценки эффективности аддитивной технологии строительства объектов военной инфраструктуры

Аннотация. В статье обосновано применение аддитивных строительных технологий для нужд обороны. Представлены результаты исследований процесса их применения при оборудовании полевых позиций воинских подразделений. Введен термин «аддитивный строительный комплекс», рассмотрены его структура, возможности использования для строительства полевых фортификационных сооружений и комплексные показатели работы. Предложена методика оценки эффективности применения строительных 3D-принтеров при решении задач инженерного оборудования полевых позиций.
Ключевые слова: 3D-печать, аддитивное строительство, аддитивный строительный комплекс, моделирование

Для цитирования: Кардаш Д.Е. Частная методика оценки эффективности аддитивной технологии строительства объектов военной инфраструктуры // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 123–129.

Введение

Составной частью вопросов мобильности воинских формирований является заблаговременное оборудование района предполагаемых боевых действий в инженерном отношении. Анализ результатов исследований и различных официальных источников показывает, что возможности применения аддитивных технологий в области обороны имеют широкую перспективу [3, 4, 6, 8, 11], но в то же время сильно ограничены отсутствием стандартов процесса аддитивного производства, дефицитом специалистов, недостаточным научно-методическим аппаратом оценки эффективности применения аддитивных технологий [1, 2, 5].

Цель работы – обоснование применения аддитивных технологий и оценка их эффективности при инженерном оборудовании полевых позиций воинских подразделений.

Задачи исследования: моделирование и оценка эффективности применения аддитивных технологий при оборудовании полевых позиций.

Обоснование предлагаемой методики

В настоящее время отмечается широкое разнообразие различных строительных технологий, имеющих высокий потенциал их применения при возведении объектов военной инфраструктуры на предполагаемом поле боя. Для выбора оптимального решения в каждом конкретном случае необходимо рассматривать комплекс факторов и оценивать эффективность применения той или иной технологии по заранее установленным критериям. Например, при оборудовании позиции войск в городской черте прежде всего следует учитывать временные

показатели, а также интегрирование в городскую инфраструктуру существующих и вновь возводимых капитальных строений для нужд организации вооруженной борьбы. При решении той же задачи в полевых условиях важно учитывать интегральный показатель прочностных и функциональных характеристик возводимых сооружений и времени, требуемого для выполнения строительных работ. Таким образом, время становится одним из факторов, определяющих оптимальность выбора.

Решение задачи по сокращению времени, отводимого для инженерного оборудования позиции на предполагаемом театре военных действий, возможно с помощью внедрения аддитивных технологий как для изготовления отдельных строительных конструкций, так и возведения объектов капитального строительства в целом. Использование аддитивных технологий в целях инженерного оборудования позиций имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными технологиями (табл. 1).

Таблица 1

**Преимущества применения аддитивных технологий
при оборудовании позиций войск**

№ п/п	Наименование показателя	Ожидаемый эффект
1	Время полного цикла строительства	меньше, из-за непрерывности процесса
2	Количество ресурсов: - рабочая сила - транспорт - управление	существенно меньше меньше, за счет оптимизации логистических схем больше степеней свободы благодаря созданию «библиотеки образцов объектов»
3	Живучесть комплекса оборудования	выше, по причине рассредоточения элементов комплекса по строительной площадке.
4	Надежность комплекса оборудования	выше, ввиду применения подвижных ремонтных мастерских и технологий возведения объектов «модульным» способом

Вместе с тем широкому внедрению аддитивных технологий для нужд инженерного оборудования позиций препятствует ряд факторов, и в первую очередь высокая стоимость (табл. 2).

Таблица 2

**Недостатки применения аддитивных технологий при оборудовании позиций войск
в сравнении с традиционными технологиями**

№ п/п	Наименование показателя	Недостаток
1	Требования к качеству материалов	Значительно выше, особенно к компонентам смесей
2	Прочность конструкции	Меньше при прочих равных параметрах
3	Сопrotивляемость конструкции ударным нагрузкам	Меньше
4	Требования к уровню профессиональной подготовки обслуживающего персонала	Обязательна специализированная подготовка
5	Живучесть 3D-принтера	Низкая: выход из строя от воздействия осколков боеприпасов малого калибра

Анализ преимуществ и недостатков аддитивных технологий, используемых при оборудовании позиций войск, показывает, что их применение возможно при соблюдении условий:

- отсутствует огневое воздействие противника;
- строительные конструкции (возведенный объект), произведенные при помощи аддитивных технологий, годны для оборудования полевых позиций, исключая специальные защитные сооружения;

– необходимо создание специализированного подразделения инженерных войск, в задачи которого будут входить обслуживание и транспортировка комплекса оборудования.

Однако, несмотря на ощутимые недостатки, отмеченные при решении ряда вопросов заблаговременного оборудования позиций для полевого размещения войск, применение аддитивных технологий целесообразно, например, для оборудования ротного опорного пункта.

Описание методики

Аддитивный строительный комплекс военного назначения должен иметь возможность функционировать автономно и включать следующие элементы (вариант):

- строительный 3D-принтер, транспортируемый в специализированном контейнере;
- электростанцию на базе автомобильного прицепа (полуприцепа);
- бетономешалку (на автомобильном базовом шасси);
- автокран;
- автомобили для перевозки расходных материалов;
- жилые модули на базе прицепов для личного состава.

Таким образом, перечисленные элементы могут быть сведены в отдельное мобильное формирование, способное выполнить весь цикл строительных работ. Ему может быть присвоено наименование «аддитивный строительный комплекс» (АСК), который относится к классу военно-технических систем. Особенности АСК являются:

- все структурные элементы удовлетворяют требованиям, определяемым способом применения войск (сил), и общим требованиям, предъявляемым к АСК;
- структура АСК имеет системный характер.

Исходя из представления о АСК как о группе элементов мера эффекта его применения определяется качеством составных частей, которые условно можно представить в виде двух модулей – базового и функционального (рис. 1).

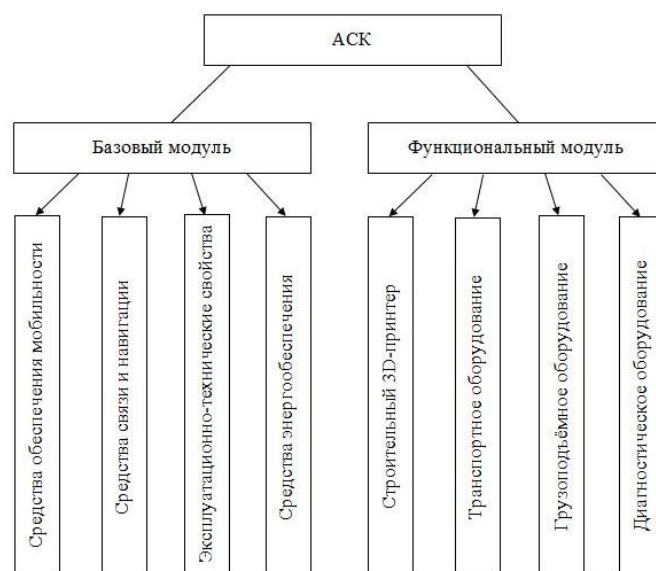


Рис. 1. Блочно-модульная структура аддитивного строительного комплекса

Исходя из системного представления об АСК процесс его применения включает две компоненты – выдвигание к месту производства работ и использование по назначению.

Компоненту выдвигания АСК можно представить в следующем виде:

$$E(S_{\text{транс.}}) = \bigcup_{i=1}^n E_i(S_i), \tag{1}$$

где $E(S_{\text{транс.}})$ – транспортная задача на выдвигание АСК от пункта постоянной дислокации в район его применения; $E_i(S_i)$ – частная транспортная задача; n – количество частных задач, решаемых в процессе решения транспортной задачи.

Аналогично можно представить компоненту применения АСК [7]:

$$E(S_{\text{работы}}) = \bigcup_{j=1}^m E_j(S_j), \tag{2}$$

где $E(S_{\text{работы}})$ – задача применения АСК в определенном районе; $E_j(S_j)$ – частная задача, возникающая в процессе применения АСК по назначению; m – количество частных задач, решаемых в процессе решения задачи применения.

Аналитически компоненты выдвижения и применения АСК можно представить в виде орграфа (рис. 2), где каждая вершина орграфа характеризует значение элемента в общей совокупности эффекта, полученного от применения АСК (табл. 3).

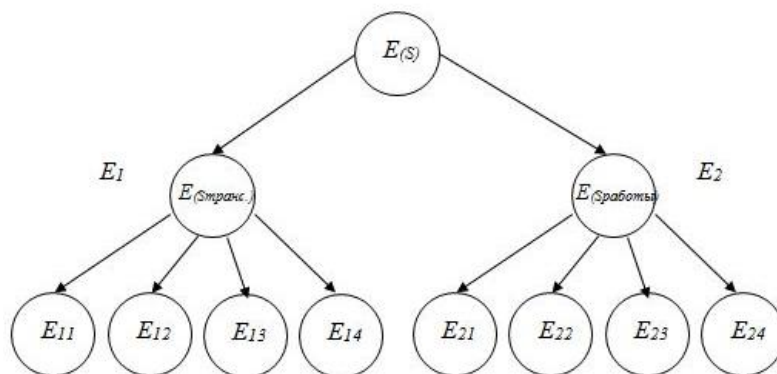


Рис. 2. Орграф применения аддитивного строительного комплекса

С точки зрения потребителя продукции АСК важно оценить комплексные показатели его работы по выполнению практической задачи, которые могут быть положены в основу производства оперативных расчетов, например на занятие позиций войсками [9, 10], для оборудования которых может применяться АСК.

Для этого комплексный показатель G_b каждого b -го свойства АСК (для обоих функциональных модулей) необходимо формировать на подмножестве $\{G_{b_\epsilon}\}$ единичных показателей, проявляемых в условиях системного окружения:

$$G_b = \bigcap_{b_\epsilon} (\{G_{b_\epsilon}\} | \{Y_{b_\epsilon}\} = const), \tag{3}$$

где Y_{b_ϵ} – подмножество параметров системного окружения, влияющих на каждый единичный показатель G_{b_ϵ} b -го свойства.

Принимая выражение (3) за основу, можно сформулировать задачу о поиске обобщенного показателя эффективности АСК:

$$K_{\text{АСК}} = K_{\text{транс}}^{\mu_{\text{транс}}} \cdot K_{\text{работы}}^{\mu_{\text{работы}}}, \tag{4}$$

где $K_{\text{транс}}$ и $K_{\text{работы}}$ – соответственно комплексные показатели эффективности выполнения задач базового и функционального модулей; $\mu_{\text{транс}}$ и $\mu_{\text{работы}}$ – соответственно коэффициенты, учитывающие частный вклад комплексных показателей в достижение обобщенного показателя.

Очевидно, что

$$\mu_{\text{транс}} + \mu_{\text{работы}} = 1. \tag{5}$$

Принимая во внимание вероятностную природу наступления математического ожидания любого завершённого процесса, каковым являются этапы применения АСК, определим множество благоприятных исходов этого процесса:

$$K_K = \prod_{b=1}^b (G_b P_b)^{\mu_b}, \tag{6}$$

где P_b – вероятность попадания в поле математического ожидания (с учетом выбранного интервала дисперсии) благоприятного исхода b -го процесса; μ_b – коэффициент влияния b -го процесса на достижение благоприятного исхода (коэффициент весомости).

Функционально-морфологическая декомпозиция частных задач АСК

№ п/п	Технологическая задача (процесс)	Частная техническая задача (подпроцесс)	Составная часть АСК, задействованного в процессе	Обозначение	
				подпроцесса	составной части
1	Выдвижение АСК к месту применения, развертывание на местности	Обеспечение мобильности	Подсистема транспортного обеспечения	S ₁₁	E ₁₁
2		Обеспечение связи и навигации	Подсистема	S ₁₂	E ₁₂
3		Обеспечение эксплуатационно-технических свойств	Подсистема обеспечения развертывания АСК на местности и эксплуатационных свойств АСК	S ₁₃	E ₁₃
4		Обеспечение энергоресурсами	Подсистема обеспечения энергоресурсами (электроэнергия, сжатый воздух и т.д.)	S ₁₄	E ₁₄
5	Применение АСК для выполнения задач по оборудованию (возведению) объекта	Оценка работоспособности строительного 3D-принтера	Подсистема планирования строительных работ	S ₂₁	E ₂₁
6		Оценка работоспособности транспортного оборудования	Подсистема планирования транспортировки оборудования (совершение марша, использование ж/д транспорта и т.д.)	S ₂₂	E ₂₂
7		Оценка работоспособности грузоподъемного оборудования	Подсистема планирования строительных работ	S ₂₃	E ₂₃
8		Оценка работоспособности диагностического оборудования	Подсистема комплексного диагностирования	S ₂₄	E ₂₄

Следующим шагом является поиск средневзвешенного значения обобщенного показателя применения технологий АСК:

$$K_z = \bigcup_{u=1}^u K_{K_u} \cdot \mu_{K_u}, \tag{7}$$

где K_{K_u} – значение показателя u -го частного свойства при оценке k -го свойства базового модуля; μ_{K_u} – коэффициент влияния u -го частного свойства при оценке k -го свойства базового модуля.

Таким образом, общая эффективность предлагаемой к внедрению технологии оценивается сравнением с нормативным (базовым) показателем средневзвешенного значения обобщенного показателя:

$$\varphi = \frac{|K_z^{баз} - K_z|}{K_z} \cdot 100\%. \tag{8}$$

Заключение

В статье приведена частная методика оценки эффективности применения аддитивного строительного комплекса для нужд инженерного оборудования позиций войск в полевых условиях (на примере ротного опорного пункта). За рамками исследования остались временные

показатели работы того или иного оборудования при возведении полевых сооружений (канониров и ангаров для укрытия техники, перекрытых щелей и блиндажей для личного состава и т.д.) ввиду сложности моделирования воздействия на предполагаемые к использованию строительные смеси средств поражения противника, в особенности артиллерийских боеприпасов.

Приведенная частная методика является предлагаемым вариантом оценки целесообразности применения АСК для нужд оборудования позиций в полевых условиях. При этом в качестве базового может быть рассмотрено любое свойство системы строительства с применением традиционных технологий. Достоинством методики является возможность численного решения частных задач.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аддитивные технологии. Базовый курс / Центр компетенций Национальной технологической инициативы по направлению «Новые производственные технологии» на базе Института передовых производственных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 2022. URL: <https://nticenter.spbstu.ru/courses/24/program> (дата обращения: 15.09.2022).
2. Бирюков Ю.А., Демьянов А.А., Сопот В.Н. Барьеры, препятствующие развитию аддитивных технологий // Развитие систем жизнеобеспечения, энергосбережение и материально-техническое обеспечение специальных объектов Министерства обороны Российской Федерации. Санкт-Петербург: ВАМТО, 2022. Ч. 1. С. 259–267.
3. Демьянов А.А., Бьядовский Д.А., Ершов М.И., Попов И.В. Анализ современного развития технологии строительной 3D-печати // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: материалы IV межвуз. конф., Санкт-Петербург, 06 февраля 2019 / науч. ред. С.С. Семенов; Военная академия связи имени маршала Советского Союза С.М. Буденного. Санкт-Петербург: ВАС, 2019. С. 136–140. EDN: BMGCRY
4. Литунов С.Н. Обзор и анализ аддитивных технологий. Ч. 1 // Омский научный вестник. 2016. № 1(145). С. 12–17.
5. О дополнительном профессиональном образовании: письмо Министерства образования и науки Российской Федерации от 9 окт. 2013 г. № 06-735. Режим доступа: «КонсультантПлюс» (дата обращения: 15.09.2022).
6. Руденко А.Е., Кардаш Д.Е. Опыт строительства аддитивным методом войсковых объектов армии США // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных сил Российской Федерации. 2020. № 3(17). С. 140–146.
7. Соболев Е.Г., Ильин А.В., Майер Д.Н. Методология оценки эффективности подвижного состава ремонта вооружения, военной и специальной техники. Теория и практика. Москва: 38 НИИИ БТВТ, 2021. С. 122.
8. Строительство зданий с помощью 3D-принтеров: мечта или реальность // Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы. 2021. URL: <https://stroim.mos.ru/mobile/articles/stroitelstvo-zdaniy-s-pomoshch-ju-3d-printerov-mechta-ili-realnost> (дата обращения: 15.09.2022).
9. Топоров А.В., Бабенков А.В., Бирюков Ю.А. Методологические подходы к оценке военно-экономической эффективности восстановления объектов военной инфраструктуры // Научные проблемы материально-технического обеспечения ВС РФ. 2019. Вып. 3(13). С. 9–20.
10. Топоров А.В., Бабенков В.И., Квашнин Б.С. Методика прогнозирования операционных затрат на производство материальных средств для обеспечения группировок войск (сил) // Научные проблемы материально-технического обеспечения ВС РФ. 2020. № 1(15). С. 9–17.
11. Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*. 2017;60(5). DOI: 10.1016/j.bushor.2017.05.011

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/123-129>

Kardash D.

DMITRY E. KARDASH – Senior Researcher, dk600328@mail.ru
Research Institute (Military System Research of the Logistics Support of the Armed Forces of the Russian Federation) of the Military Academy of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulev
 Saint-Petersburg, Russia

A private methodology for evaluating the effectiveness of additive technology for the construction of military infrastructure objects

Abstract. The article substantiates the use of additive construction technologies for defense needs. The results of studies of the process of their application in equipping field positions of military units are presented. The term "additive building complex" is introduced, its structure, the possibilities of using for the construction of field fortifications and complex performance indicators are considered. A technique for evaluating the effectiveness of the use of construction 3D printers in solving problems of engineering equipment of field positions is proposed.

Keywords: 3D printing, additive construction, additive building complex, modeling

For citation: Kardash D. A private methodology for evaluating the effectiveness of additive technology for the construction of military infrastructure objects. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):123–129. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
 The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Additive technologies. Basic course. Competence Center of the National Technological Initiative in the direction of "New Production Technologies" on the basis of the Institute of Advanced Production Technologies of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2022. URL: <https://nticenter.spbstu.ru/courses/24/program> – 09.15.2022. (In Russ.).
2. Biryukov Yu., Demyanov A., Sopot V. Barriers preventing the development of additive technologies. Development of life support systems, energy saving and logistics of special facilities of the Ministry of Defense of the Russian Federation. St. Petersburg, VAMTO, 2022. Part 1. P. 259–267. (In Russ.).
3. Demyanov A., Byadovsky D., Ershov M., Popov I. Analysis of the modern development of construction 3D printing technology. *Problems of technical support of troops in modern conditions: Proc. of the IV Interuniversity Conf., St. Petersburg, February 06, 2019*. Sci. ed. S. Semenov; Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. St. Petersburg, VAS, 2019. P. 136–140. (In Russ.). EDN: BMGCRY
4. Litunov S. Review and analysis of additive technologies. Part 1. *Omsk Scientific Bulletin*. 2016;(1):12–17. (In Russ.).
5. On additional professional education: a letter from the Ministry of Education and Science Russian Federation of 9 Oct. 2013 No. 06-735. Access mode: LPS «ConsultantPlus» – 09.15.2022. (In Russ.).
6. Rudenko A., Kardash D. Experience in the construction of military facilities of the US Army by the additive method. *Scientific challenges of logistical support of the armed forces of the Russian Federation*. 2020;(3):140–146. (In Russ.).
7. Sobolev E., Ilyin A., Mayer D. Methodology for assessing the effectiveness of the rolling stock repair of weapons, military and special equipment. Theory and practice. Moscow, 38 Research and Testing Institute of Armored Weapons and Equipment Press, 2021. 122 p. (In Russ.).
8. Construction of buildings using 3D printers: dream or reality. Complex of urban policy and construction of the city of Moscow, 2021. URL: <https://stroim.mos.ru/mobile/articles/stroitel-stvo-zdaniy-s-pomoshch-iu-3d-printerov-miechta-ili-riial-nost> – 15.09.2022. (In Russ.).
9. Toporov A., Babenkov A., Biryukov Yu. Methodological approaches to assessing the military-economic efficiency of restoring military infrastructure facilities. *Scientific challenges of logistical support of the armed forces of the Russian Federation*. 2019;(3):9–20. (In Russ.).
10. Toporov A., Babenkov V., Kvashnin B. Methodology for forecasting operating costs for the production of material assets to ensure groupings of troops (forces). *Scientific challenges of logistical support of the armed forces of the Russian Federation*. 2020;(1):9–17. (In Russ.).
11. Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*. 2017;60(5). DOI: 10.1016/j.bushor.2017.05.011

Строительная механика

Научная статья

УДК 69.04

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/130-140>

О.С. Горячевский, И.Ю. Негрозова

ГОРЯЧЕВСКИЙ ОЛЕГ СЕРГЕЕВИЧ – заместитель директора, osgoryachevskij@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-8219-4598>

НЕГРОЗОВА ИРИНА ЮРЬЕВНА – младший научный сотрудник, irina-lanzova@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-8501-9306>

Научно-образовательный центр компьютерного моделирования уникальных зданий,
сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова

*Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет*

Москва, Россия

Неопределенность назначения ветровых нагрузок от флага

Аннотация. Освещена актуальность определения ветровых нагрузок на свободно развевающиеся флаги в связи с возникшей тенденцией к соревновательному строительству сверхвысоких флагштоков, снабженных флагами огромной площади. Приведены основные научные работы, в которых предпринимались попытки исследовать сложное явление обтекания потоком развевающегося флага. Проведено сопоставление ветровых нагрузок на флаги, определенных по различной нормативно-технической литературе. В результате сопоставительного анализа выявлены существенные различия в ветровых нагрузках, определенных по различным источникам. Даны рекомендации проектировщикам.

Ключевые слова: ветровая нагрузка, флаг, флагшток

Для цитирования: Горячевский О.С., Негрозова И.Ю. Неопределенность назначения ветровых нагрузок от флага // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С.130–140.

Введение

Относительно недавно возникшая мода на возведение флагштоков рекордной высоты (рис. 1) требует сложных и дорогих конструктивных решений (например, устройство гасителей колебаний) и выводит задачу обоснования механической безопасности на другой уровень – объекты выше 100 м считаются уникальными. В частности, флагштоки высотой 175 м планируются к возведению на береговой линии Парка 300-летия Санкт-Петербурга (рис. 1д). Определение ветровых воздействий для таких конструкций, особенно от флага, размеры которого зачастую достигают циклопических размеров, становится крайне актуальной задачей.

Механическая безопасность высоких флагштоков, расположенных на открытом воздухе, в первую очередь определяется способностью противостоять ветровым нагрузкам двух типов:

- основная ветровая нагрузка;
- нагрузки от резонансного вихревого возбуждения.

Для обоих типов ветровая нагрузка складывается в основном из приходящейся на стойку и на флаг. Как правило, стойка флагштока представляет собой круглую трубу переменного сечения, и ветровые воздействия на неё при проектировании определяются с помощью

© Горячевский О.С., Негрозова И.Ю., 2022

Статья: поступила: 05.10.2022; рецензия: 18.11.2022; финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект: «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» FSWG-2020-0007).

известных методов: физического (экспериментального) моделирования [2, 11], математического (численного) моделирования [2, 5] или попросту из справочных данных [3, 6, 10, 15]. Таким образом, для стойки флагштока нет принципиальных проблем с определением основных ветровых нагрузок и нагрузок от резонансного вихревого возбуждения.

Совсем другая ситуация обстоит с ветровыми воздействиями на флаг. В справочной литературе и нормативных документах можно найти значения аэродинамических коэффициентов «лобового сопротивления» (вдоль потока) для флагов, но нет никаких данных, позволяющих определить ветровые нагрузки поперек потока и частоты срыва вихрей, необходимые для расчета конструкции на вихревое возбуждение [1, 3, 8, 9, 15]. Динамическое поведение флага в ветровом потоке также важно для корректного учета пульсационной составляющей ветровой нагрузки, но в имеющихся источниках обычно делается отсылка, что динамический эффект уже учтен в значении аэродинамического коэффициента [8, 9, 15]. Такая отсылка является некорректной, так как динамический отклик зависит от собственных форм и частот колебаний конструкции.

С представленными в нормативной и технической литературе данными по аэродинамическим коэффициентам лобового сопротивления тоже есть неопределенность. Почти во всех случаях (кроме [8]) они определены на основе лабораторных испытаний маленьких флагов. Однако обтекание флага воздухом при высоких скоростях ветра – это сложный аэроупругий процесс, моделировать который можно только при соблюдении целого ряда условий подобия. Стандартный подход к продувке макетов зданий с фиксированными точками отрыва потока, обосновывающийся предположением о сохранении автомодельности даже при числах Рейнольдса порядка 10^8 , для аэроупругих явлений совершенно некорректен.

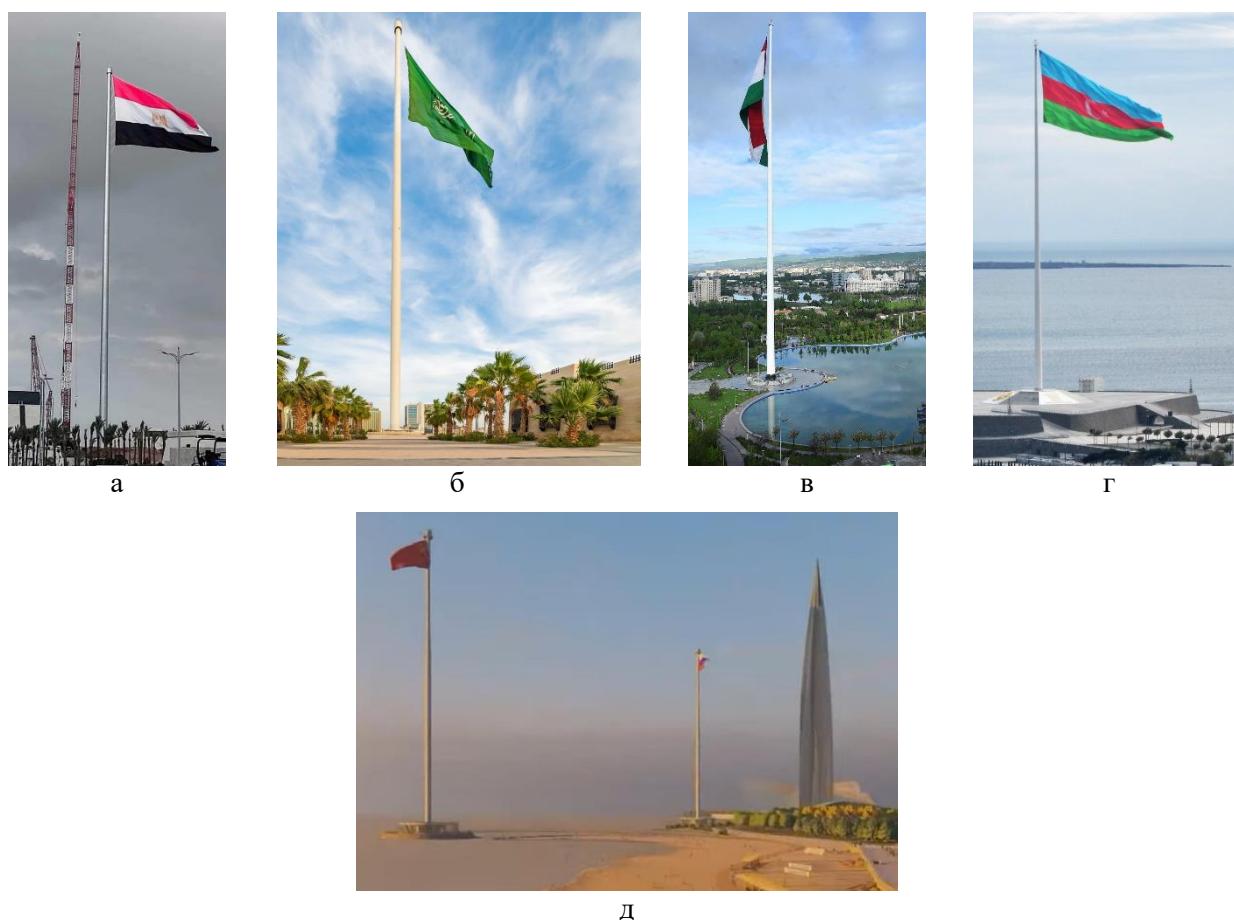


Рис. 1. Высочайшие флагштоки в мире:

- а – Каир, Египет (201,95 м, 2021 г); б – Джидда, Саудовская Аравия (171 м, 2014 г);**
- в – Душанбе, Таджикистан (165 м, 2011 г); г – Баку, Азербайджан (162 м, 2010 г);**
- д – Санкт-Петербург, Россия (концепт)**

Цель данного исследования – осветить проблему существенной неопределенности в опубликованных параметрах ветровых воздействий для флагов и предложить некоторые пути её решения. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- обзор методов моделирования ветровых воздействий на флаги;
- обзор нормативной и технической литературы по назначению ветровых нагрузок на флаги;
- сравнение ветровых нагрузок, полученных по различным источникам;
- выработка предложений по решению проблемы.

История моделирований развевающихся флагов

Развевающиеся на ветру флаги – обыкновенное явление, но его исследование по-прежнему остается сложной задачей как для экспериментальных, так и для численных подходов, в первую очередь из-за сложного поведения свободно движущихся границ. Есть множество достойных исследований, посвященных решению данной проблемы. Однако до сих пор остаются значимыми расхождения в обнаруживаемых закономерностях и их интерпретации.

Результаты экспериментального исследования развевающихся флагов в однородном потоке представлены в работе [29], где показано, что флаг переходит из устойчивого режима в «хлопающий» (конец флага начинает совершать движение в противоположную потоку сторону и издавать соответствующий звук – эффект, схожий с ударом кнутом). Подобное явление наблюдалось в экспериментах с жидкостью с мыльной пленкой, текущей под действием силы тяжести [27, 36]. В этом исследовании приводится сравнение обтекания гибкой шелковой нити и жесткой металлической проволоки и утверждается, что сопротивление жидкости для гибкой нити в 2–3 раза меньше, чем для проволоки. Численное моделирование поведения гибкого упругого волокна, погруженного в двумерный вязкий поток, также показало, что гибкое волокно испытывает меньшее сопротивление по сравнению с более жестким [37, 39].

Численное моделирование развевающегося флага получило большее распространение после разработки метода погруженной границы (immersed boundary) [18, 27, 30, 37, 38] из-за его простоты и эффективности при обработке больших перемещений и деформаций твердого тела в газовой/жидкой среде. С помощью численного моделирования, проведенного с использованием метода погруженной границы, впервые была подтверждена теоретическая оценка [28], что для устойчивых взмахов флага необходима некоторая минимальная масса [38]. Численное моделирование, представленное в работе [29], показало, что ненулевая масса является необходимым условием для установления устойчивого режима взмахов одиночного флага в конвективно-неустойчивых потоках, в то время как для ситуации с несколькими флагами, установленными с малым шагом в абсолютно неустойчивых течениях, это условие не является обязательным. В случае с несколькими флагами наблюдалось больше вариантов «хлопающих» режимов, чем в случае с одиночным [1, 16, 21, 26, 38]. Например, при изменении расстояния между тремя линейно расположенными флагами в численных исследованиях обнаружилось пять «хлопающих» режимов [31]. Исследование трехмерного флага [19, 33] выявило, что по сравнению с двухмерным флагом, трехмерный более стабилен. Также показано [19], что число Струхала зависит от плотности флага $St \sim \rho_s^{-1/2}$, где ρ_s – поверхностная плотность флага.

В одних исследованиях рассматривалось обтекание флагов в однородном потоке с граничными условиями дальнего поля или условиями «симметрии», чтобы исключить влияние границ области [14, 21, 31, 37, 38]. В других, наоборот, изучалось влияние границ, так называемый эффект стенки [12, 17, 23–25, 34, 35].

Обзор нормативной и технической литературы по назначению ветровых нагрузок на флаги

В «Руководстве по расчету зданий и сооружений на действие ветра», подготовленном М.Ф. Барштейном [1], в пункте 5.18 приводится рекомендация по назначению коэффициента

лобового сопротивления, а именно принять его равным 1,4. Дополнительно дано указание по учету площади: для натянутого флага учитывается вся его площадь, подверженная действию ветра; для свободно висящего флага – ¼ его площади.

В «Атласе аэродинамических характеристик строительных конструкций», составленном М.А. Березиным и В.В. Катюшиным [3], приводятся коэффициенты лобового сопротивления для натянутых и свободно висящих флагов (рис. 2). Так, для натянутых флагов (рис. 2а) с соотношением сторон $\lambda = c/b = 1 \dots 6$ и числом Рейнольдса $Re = bU/\nu = 10^5 \dots 10^6$ (U – скорость потока, ν – кинематическая вязкость среды), независимо от типа ткани, рекомендуется принять коэффициент лобового сопротивления равным 1,17. Для свободно висящих флагов при тех же соотношениях сторон и числах Рейнольдса дана формула для вычисления коэффициента лобового сопротивления шелковых флагов:

$$C_x = C_{x0} \cdot K, \tag{1}$$

где C_{x0} – коэффициент лобового сопротивления шелкового флага ($\gamma=100$ [г/м²]); $K = (0,006\gamma + 0,4)$ – поправочный коэффициент; γ [г/м²] – удельная плотность флага.

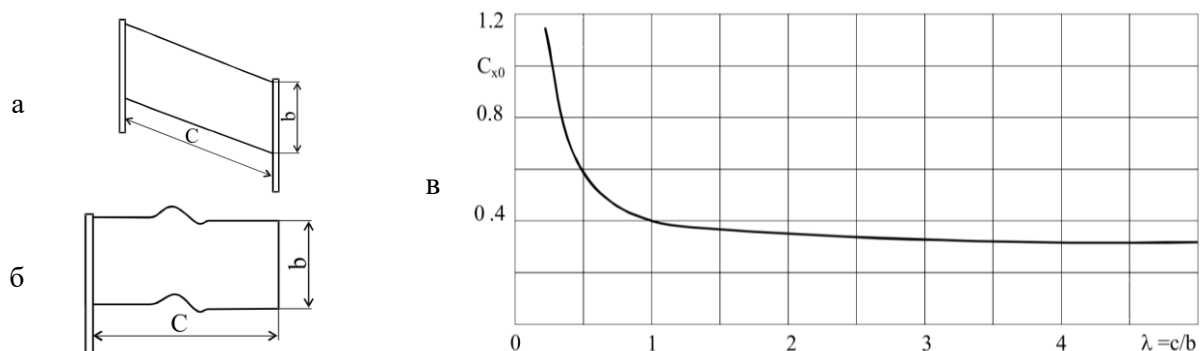


Рис. 2. Из «Атласа аэродинамических характеристик»:
а – схема натянутого флага; б – схема свободно висящего флага;
в – коэффициент лобового сопротивления шелкового флага плотностью 100 г/м²

В Eurocode [15] даются следующие рекомендации по назначению коэффициента лобового сопротивления:

- для натянутых флагов принять равным 1,8;
- для свободно висящих флагов следует определять по формуле

$$c_f = 0.02 + 0.7 \frac{m_r}{\rho h} \cdot \left(\frac{A_{ref}}{h^2} \right)^{-1.25}, \tag{2}$$

где m_r – масса на единицу площади флага, ρ – плотность воздуха, h – высота флага, A_{ref} – базовая площадь (рис. 3).

Указано, что формула для незакрепленных флагов уже содержит динамические силы с учетом эффекта развевания (флаттера).

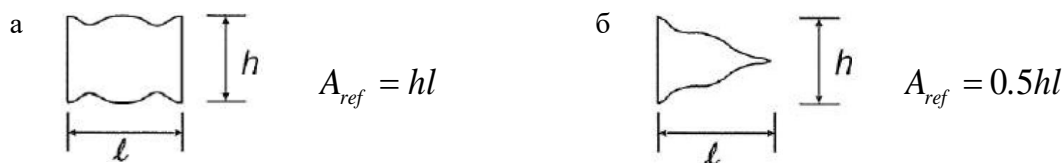


Рис. 3. Базовые площади флагов согласно Eurocode:
а – схема прямоугольного флага; б – схема треугольного флага

В нормах Австралии/Новой Зеландии AS-NZS 1170-2 [9] приводится формула для определения аэродинамического коэффициента для свободно закрепленных флагов:

$$c_f = 0.05 + 0.7 \frac{m_f}{\rho_{air} c} \cdot \left(\frac{A_{ref}}{c^2} \right)^{-1.25}, \quad (3)$$

где m_f – масса на единицу площади флага; ρ_{air} – плотность воздуха; c – высота флага; l_f – длина флага; A_{ref} – базовая площадь флага (рис. 4).

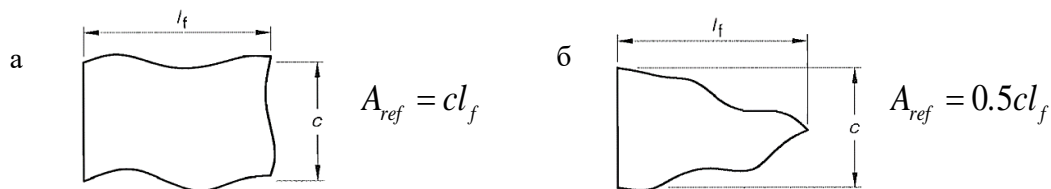


Рис. 4. Базовые площади флагов согласно Австралийским/Новозеландским нормам: а – схема прямоугольно флага; б – схема треугольного флага

Заметим, что в нормах Австралии/Новой Зеландии AS-NZS 1170-2 используется скорость ветра с 3-секундным интервалом осреднения, а пульсационную составляющую скорости при определении суммарной ветровой нагрузки определять не требуется.

В нормах США ASCE 7-16 [10] имеется ссылка на Руководство по проектированию металлических флагштоков ANSI/NAAMM FP1001-07 [8]. Согласно ANSI/NAAMM FP1001-07 нагрузка, действующая на стойку в результате воздействия ветра на флаг, должна быть рассчитана по следующим формулам:

– для нейлоновых и хлопковых флагов

$$W_F = 0.0730 V^2 \sqrt{A_F} C_h G, \quad (4)$$

– для флагов из полиэстера

$$W_F = 0.1022 V^2 \sqrt{A_F} C_h G, \quad (5)$$

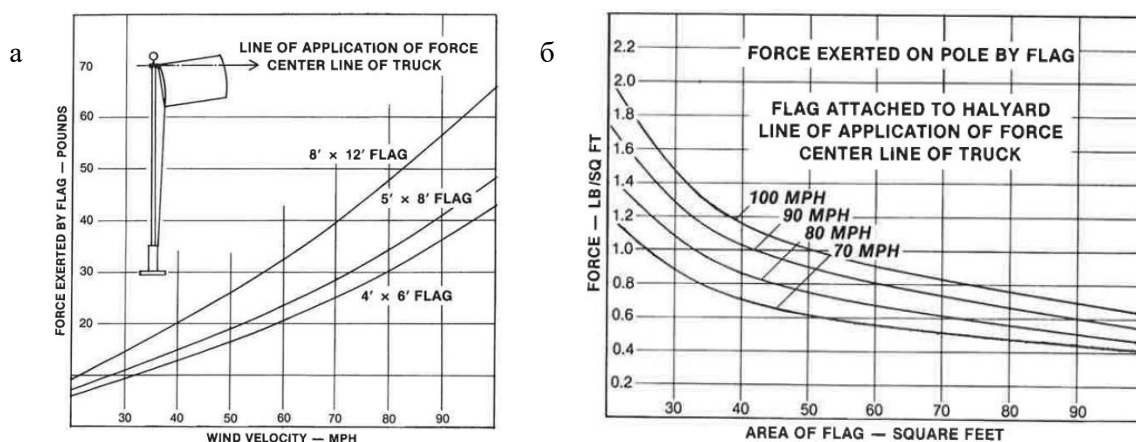
где W_F – ветровая нагрузка от флага на флагшток; V – скорость ветра с 3-секундным интервалом осреднения (м/с^2); A_F – площадь флага (м^2); C_h – коэффициент, учитывающий изменение ветровой нагрузки по высоте; G – коэффициент воздействия порыва (рекомендовано использовать минимальное значение 1.14).

Выражения (4) и (5) представляют собой эмпирические формулы, основанные на данных, полученных в результате летных испытаний нейлоновых прямоугольных флагов $1,52 \times 2,44$ м ($3,72 \text{ м}^2$), $2,44 \times 3,66$ м ($8,92 \text{ м}^2$), $3,66 \times 5,49$ м ($20,07 \text{ м}^2$), $4,57 \times 7,62$ м ($34,84 \text{ м}^2$) и $6,1 \times 9,14$ м ($55,74 \text{ м}^2$). В дополнение к пяти нейлоновым флагам был протестирован один флаг из полиэстера размером $4,57 \times 7,62$ м. При испытаниях данные о ветровых воздействиях были записаны для скоростей ветра: 30,9; 36; 41,2; 46,3; 51,4 и 56,6 м/с.

Формулы (4) и (5) представляют собой значения, которые достаточно хорошо аппроксимируют данные, непосредственно полученные при испытаниях. Результаты летных испытаний, имеют серьезное преимущество по сравнению с данными лабораторных испытаний, которые использовались в качестве основы для определения ветровых нагрузок в ранних версиях стандарта и в [12]. Это преимущество обусловлено фактически натурными условиями проведенных опытов, такими как реальные масштабы флагов, скорости ветра и атмосферная турбулентность.

Считается, что результаты проведенных NAAMM летных испытаний лучшие из доступных в настоящее время. Хотя летные испытания с хлопковыми флагами не проводились, такие флаги прошли сравнительные лабораторные испытания на ветровую нагрузку с нейлоновыми флагами, и было установлено, что они обладают эквивалентным сопротивлением.

Старые рекомендации [12] основывались на испытаниях небольших флагов трех размеров (4×6 , 5×8 и 8×12 футов) при скоростях ветра от 20 до 100 миль/час, генерируемых авиационной турбиной, и были представлены только в графическом виде (рис. 5).



**Рис. 5. Рекомендации по назначению ветровых нагрузок согласно [12]:
 а – зависимость нагрузки от скорости ветра для разных размеров флагов;
 б – зависимость погонной нагрузки от площади флага для разных скоростей**

Примечательно, что полученная зависимость ветровой нагрузки от скорости ветра далека от квадратичной (рис. 5а). Следовательно, стандартный подход по определению ветровых нагрузок через аэродинамический коэффициент, не зависящий от скорости ветра, в данном случае некорректен.

Сравнение нормативной и технической литературы по назначению ветровых нагрузок на флаги

Для иллюстрации огромных отличий в ветровых нагрузках от флагов, полученных по различным нормативным и техническим документам, приведем графики значений приведенных аэродинамических коэффициентов для различных размеров флагов. Во всех случаях считаем флаг расположенным на высоте 100 м над землей во II ветровом районе и типе местности А согласно СП 20.13330.2016 [6].

Приведенный аэродинамический коэффициент определяется по формуле

$$C_x = \frac{F_x}{w_0 k (1 + \zeta v) A}, \tag{6}$$

где F_x – ветровая нагрузка, определенная по различным источникам; A – площадь флага; $w_0 = 300$ Па – нормативный напор; $k(100\text{ м}) = 2,00$ – высотный коэффициент; $\zeta(100\text{ м}) = 0,54$ – коэффициент пульсаций; v – коэффициент пространственной корреляции пульсаций (зависит от размера флага).

Для единообразия в характеристиках набегающего потока в формулах (4), (5) вместо высотного коэффициента C_h использовался аналогичный в СП [6] коэффициент $k(z_e) = k(100\text{ м}) = 2,00$. Так как в формулах (3)–(5) принята скорость ветра с 3-секундным осреднением, а в СП [6] принято 10-минутное осреднение, то скорость $V = V_3$ определялась с пересчетом из V_{600} по рекомендациям ASCE [10]:

$$V_3 = 1.434 \cdot V_{600} = 1.434 \cdot \sqrt{\frac{2w_0}{\rho_{air}}} = 1.434 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 300\text{ Па}}{1.25\text{ кг/м}^3}} = 31.42\text{ м/с}. \tag{7}$$

На рис. 6 представлены значения приведенного аэродинамического коэффициента C_x (б) прямоугольного флага в зависимости от степени удлинения a/h (a – длина флага по направлению ветра, h – высота). Из рисунка следует, что C_x , согласно данным Руководства [1] и Атласа [3], существенно выше, чем по нормативным документам [8, 9,15]. Поэтому на рис. 6 б–е приведены графики только для нормативных документов.

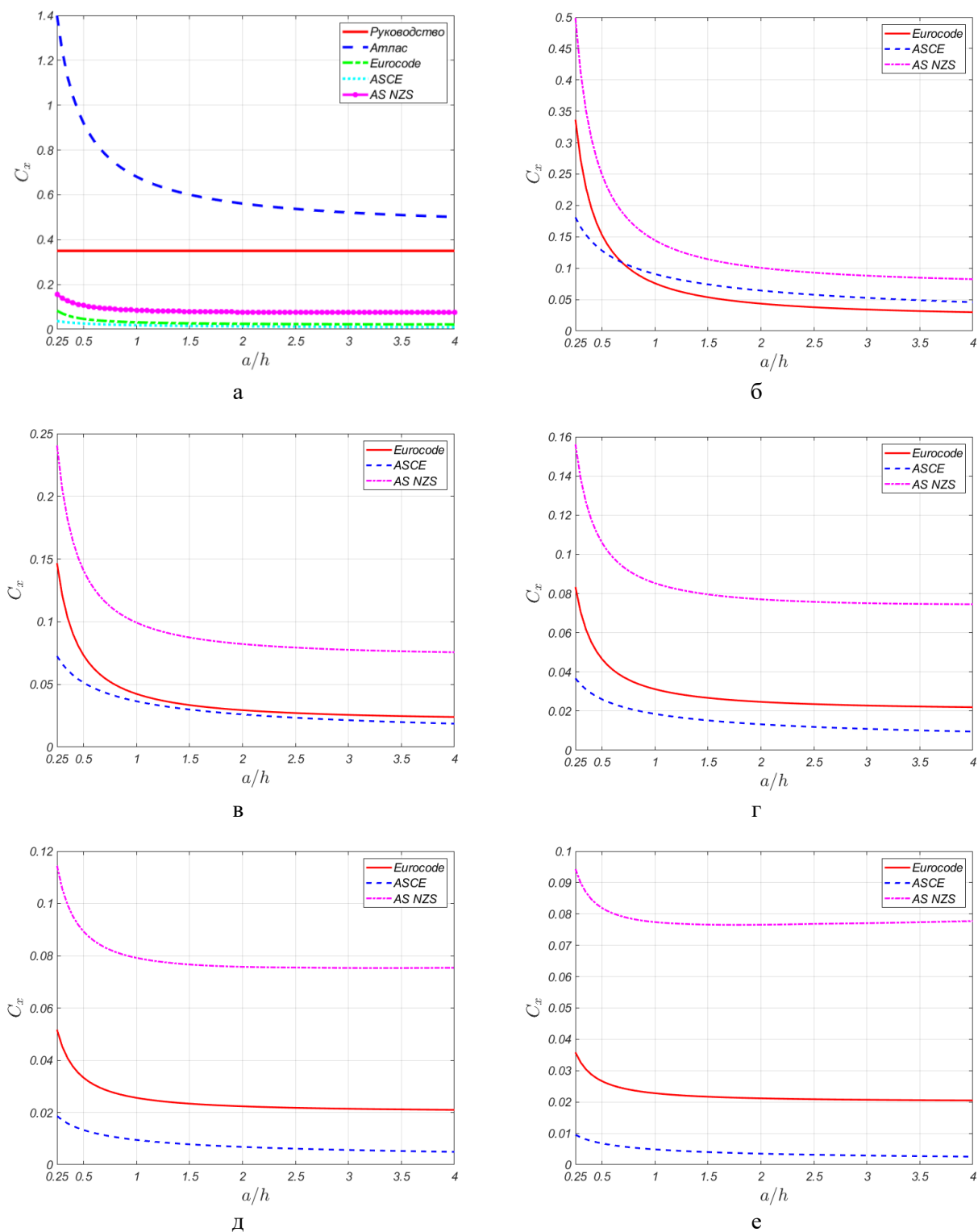


Рис. 6. Сравнение приведенного аэродинамического коэффициента в зависимости от отношения длины к высоте флага для различных высот флага h : а – $h=10$ м (5 источников); б – $h=2$ м; в – $h=5$ м; г – $h=10$ м; д – $h=20$ м; е – $h=40$ м

Заключение

В результате обзорного исследования выявлена недостаточная изученность физических процессов, происходящих при обтекании флагов потоком воздуха. Возникающие динамические эффекты при «хлопающем» режиме обтекания флага имеют в основном качественное описание, не позволяющее сделать надежные количественные оценки частотно-амплитудных характеристик сил, передающихся на флагшток.

В нормативной и технической литературе наблюдается серьезная неопределенность предлагаемых аэродинамических коэффициентов. Количественный анализ показывает, что определяемые по разным источникам нагрузки от флага различаются многократно. Судя по всему, аэродинамические коэффициенты, предлагаемые в Руководстве [1] и Атласе [3], сильно завышены, что может затруднить проектирование высоких флагштоков, снабженных флагами большой площади. Авторы статьи рекомендуют использовать в проектировании данные Еврокода как легко применимые и основанные на одинаковом с СП 20.13330.2016 [6] 10-минутном интервале осреднения скорости ветра. Рекомендации американского сообщества инженеров-строителей [8] кажутся наиболее надежными, так как основаны на исследованиях в натурном масштабе в условиях реальных турбулентных скоростей ветра. Кроме того, количественный анализ показал, что нагрузки согласно [8] оказываются самыми низкими из представленных. Однако использовать в проектировании рекомендации [8] следует с осторожностью, так как они основаны на 3-секундном осреднении скорости ветра. Отечественные метеостанции не предоставляют данных по скоростям ветра с 3-секундным осреднением, а использование эмпирических зависимостей [10] может быть ненадежным.

Результаты моделирования ветровых нагрузок на маленькие флаги в аэродинамических трубах переносить на крупные флаги некорректно, так как в таком сложном аэроупругом процессе не может быть и речи об автомодельности [4]. Численное моделирование указанного явления представляется довольно перспективным с научной точки зрения, однако его достоверность должна быть валидирована натурными данными.

Имея в виду возросшую в последнее годы актуальность вопроса о ветровых нагрузках от флагов, авторы статьи выражают надежду на появление новых исследований, основанных на реальных натурных данных. Получить натурные данные можно было бы с помощью размещения систем мониторинга на высоких флагштоках, фиксирующих скорости ветра и соответствующие ускорения вершины флагштока.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект: «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» FSWG-2020-0007).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Барштейн М.Ф. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. Москва: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1978. 215 с.
2. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. Москва: Изд-во АСВ, 2017. 720 с.
3. Березин М.А., Катюшин В.В. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций. Новосибирск: Олден-полиграфия, 2003. 130 с.
4. Горлин С.М. Экспериментальная аэродинамика. Москва: Высшая школа, 1970. 423 с.
5. Математическое (численное) моделирование ветровых нагрузок и воздействий: Методическое пособие. Москва: ФАУ ФЦС Минстроя России, 2020. URL: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp11_2020.pdf
6. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия (с изм. N 1, 2, 3). Москва: Минрегион России, 2021.
7. Alben S. Wake-mediated synchronization and drafting in coupled flags. *Journal of Fluid Mechanics*. 2009;641:489–496. DOI: 10.1017/S0022112009992138
8. ANSI/NAAMM FP1001-07 Guide Specifications for Design of Metal Flagpoles, 2007
9. AS-NZS 1170-2. Australian / New Zealand standard, structural design actions. Part 2: Wind actions. 2011.
10. ASCE/SEI 7-16. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and other Structures. USA, ASCE, 2017.
11. ASCE/SEI 49-21. Wind Tunnel Testing for Buildings and Other Structures. USA, ASCE, 2021.
12. Metal Flagpole Manual. Chicago, Illinois, NAAM, 1980. 43 p.

13. Dai L., He G., Zhang X. Self-propelled swimming of a flexible plunging foil near a solid wall. *Bioinspiration & biomimetics*. 2016;11(4):046005. DOI: 10.1088/1748-3190/11/4/046005
14. Eloy C. et al. Aeroelastic instability of cantilevered flexible plates in uniform flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2008;611):97–106. DOI:10.1017/S002211200800284X
15. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–4: General actions – Wind action, CEN, 2010.
16. Farnell D.J.J., David T., Barton D.C. Coupled states of flapping flags. *Journal of fluids and structures*. 2004;19(1):29–36. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2003.10.001
17. Fernández-Prats R. et al. Large-amplitude undulatory swimming near a wall. *Bioinspiration & biomimetics*. 2015;10(1):016003. DOI: 10.1088/1748-3190/10/1/016003
18. Huang W. X., Shin S. J., Sung H. J. Simulation of flexible filaments in a uniform flow by the immersed boundary method. *Journal of computational physics*. 2007;226(2):2206–2228. DOI: 10.1016/j.jcp.-2007.07.002
19. Huang W. X., Sung H. J. Three-dimensional simulation of a flapping flag in a uniform flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2010;653:301–336. DOI: 10.1017/S0022112010000248
20. Lantsova I. Numerical simulation of fluid-structure interaction by the example of a flow past a cylinder with a flexible thin structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021;1030(1):012084. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012084
21. Michelin S., Smith S.G.L. Linear stability analysis of coupled parallel flexible plates in an axial flow. *Journal of Fluids and Structures*. 2009;25(7):1136–1157. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2009.06.002
22. Michelin S., Smith S.G.L., Glover B. J. Vortex shedding model of a flapping flag. *Journal of Fluid Mechanics*. 2008;617:1–10. DOI: 10.1017/S0022112008004321
23. Park S.G., Kim B., Sung H.J. Hydrodynamics of a self-propelled flexible fin near the ground. *Physics of Fluids*. 2017;29(5):051902. DOI: 10.1063/1.4983723
24. Quinn D.B. et al. Unsteady propulsion near a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014;742:152–170. DOI: 10.1017/jfm.2013.659
25. Quinn D.B., Lauder G.V., Smits A.J. Flexible propulsors in ground effect. *Bioinspiration & biomimetics*. 2014;9(3):036008. DOI: 10.1088/1748-3182/9/3/036008
26. Schouveiler L., Eloy C. Coupled flutter of parallel plates. *Physics of fluids*. 2009;21(8):081703. DOI: 10.1063/1.3204672
27. Shelley M. J., Zhang J. Flapping and bending bodies interacting with fluid flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2011;43(1):449–465. DOI: 10.1146/annurev-fluid-121108-145456
28. Shelley M., Vandenberghe N., Zhang J. Heavy flags undergo spontaneous oscillations in flowing water. *Physical review letters*. 2005;94(9):094302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.094302
29. Taneda S. Waving motions of flags. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1968;24(2):392–401. DOI:10.1143/JPSJ.24.392
30. Tian F. B. et al. An efficient immersed boundary-lattice Boltzmann method for the hydrodynamic interaction of elastic filaments. *Journal of computational physics*. 2011;230(19):7266–7283. DOI: 10.1016/j.jcp.2011.05.028
31. Tian F.B. et al. Coupling modes of three filaments in side-by-side arrangement. *Physics of Fluids*. 2011;23(11):111903. DOI: 10.1063/1.3659892
32. Tian F.B. Role of mass on the stability of flag/flags in uniform flow. *Applied Physics Letters*. 2013;103(3):034101. DOI: 10.1063/1.4813006
33. Tian F., Lu X., Luo H. Onset of instability of a flag in uniform flow. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2012;2(2):022005. DOI: 10.1063/2.1202205
34. Wang S., He G., Zhang X. Self-propulsion of flapping bodies in viscous fluids: recent advances and perspectives. *Acta Mechanica Sinica*. 2016;32(6):980–990. DOI: 10.1007/s10409-016-0578-y
35. Zhang C., Huang H., Lu X. Y. Free locomotion of a flexible plate near the ground. *Physics of Fluids*. 2017;29(4):041903. DOI: 10.1063/1.4981778
36. Zhang J. et al. Flexible filaments in a flowing soap film as a model for one-dimensional flags in a two-dimensional wind. *Nature*. 2000;408(6814):835–839. DOI: 10.1038/35048530
37. Zhu L., Peskin C. S. Drag of a flexible fiber in a 2D moving viscous fluid. *Computers & fluids*. 2007;36(2):398–406. DOI:10.1016/j.compfluid.2006.02.002
38. Zhu L., Peskin C. S. Interaction of two flapping filaments in a flowing soap film. *Physics of fluids*. 2003;15(7):1954–1960. DOI: 10.1063/1.1582476
39. Zhu L., Peskin C. S. Simulation of a flapping flexible filament in a flowing soap film by the immersed boundary method. *Journal of Computational Physics*. 2002;179(2):452–468. DOI: 10.1006/jcph. 2002.7066

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/130-140>

Goryachevsky O., Negrozova I.

OLEG S. GORYACHEVSKY, Deputy Director, osgoryachevskij@mail.ru,<https://orcid.org/0000-0001-8219-4598>IRINA Yu. NEGROZOVA, Junior Researcher, irina-lanzova@mail.ru,<https://orcid.org/0000-0001-8501-9306>

Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings,

Structures and Complexes named after A.B. Zolotova

National Research Moscow State University of Civil Engineering

Moscow, Russia

Uncertainty of assignment of wind loads from the flag

Abstract. This article discusses the relevance of determining wind loads on freely waving flags in connection with the emerging trend towards the competitive construction of ultra-high flagpoles equipped with flags of a huge area. The main scientific works have been reviewed in which attempts to investigate the complex phenomenon of flow around a waving flag was made. A comparison of wind loads on the flags calculated using different approaches from codes and standards as well as from available technical literature is provided. As a result of comparative analysis, significant differences in wind loads determined using various methods were revealed. Recommendations for engineers and designers are developed and provided in this paper.

Keywords: wind load, flag, flagpole

For citation: Goryachevsky O., Negrozova I. Uncertainty of assignment of wind loads from the flag. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):130–140. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Barstein M.F. Guidance for the calculation of buildings and structures for the action of the wind. Moscow, TsNIISK named after Kucherenko. 1978. 215 p. (In Russ.).
2. Belostotsky A.M., Akimov P.A., Afanas'eva I.N. Computational aerodynamics in construction problems. Tutorial. Moscow, ASV Publishing House, 2017. 720 p. (In Russ.).
3. Berezin M.A., Katyushin V.V. Atlas of aerodynamic characteristics of building structures. Novosibirsk, Olden-Polygraphy, 2003. 130 p. (In Russ.).
4. Gorlin S.M. Experimental aerodynamics. Moscow, Vysshaja shkola, 1970. 423 p. (In Russ.).
5. Methodological manual "Mathematical (numerical) modeling of wind loads and impacts" (to SP 20.13330.2016). Moscow, FAU FTS of the Ministry of Construction of Russia, 2020. URL: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp11_2020.pdf (In Russ.).
6. SP 20.13330.2016 Loads and impacts (as amended No. 1, 2, 3). Moscow, Ministry of Regional Development of Russia, 2021. (In Russ.).
7. Alben S. Wake-mediated synchronization and drafting in coupled flags. *Journal of Fluid Mechanics*. 2009;641:489–496. DOI: 10.1017/S0022112009992138
8. ANSI/NAAMM FP1001-07 Guide Specifications for Design of Metal Flagpoles, 2007
9. AS-NZS 1170-2. Australian / New Zealand standard, structural design actions. Part 2: Wind actions. 2011.
10. ASCE/SEI 7-16. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and other Structures. USA, ASCE, 2017.
11. ASCE/SEI 49-21. Wind Tunnel Testing for Buildings and Other Structures. USA, ASCE, 2021.
12. Metal Flagpole Manual. Chicago, Illinois, NAAM, 1980. 43 p.
13. Dai L., He G., Zhang X. Self-propelled swimming of a flexible plunging foil near a solid wall. *Bioinspiration & biomimetics*. 2016;11(4):046005. DOI: 10.1088/1748-3190/11/4/046005

14. Eloy C. et al. Aeroelastic instability of cantilevered flexible plates in uniform flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2008;611):97–106. DOI:10.1017/S002211200800284X
15. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–4: General actions – Wind action, CEN, 2010.
16. Farnell D.J.J., David T., Barton D.C. Coupled states of flapping flags. *Journal of fluids and structures*. 2004;19(1):29–36. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2003.10.001
17. Fernández-Prats R. et al. Large-amplitude undulatory swimming near a wall. *Bioinspiration & biomimetics*. 2015;10(1):016003. DOI: 10.1088/1748-3190/10/1/016003
18. Huang W. X., Shin S. J., Sung H. J. Simulation of flexible filaments in a uniform flow by the immersed boundary method. *Journal of computational physics*. 2007;226(2):2206–2228. DOI: 10.1016/j.jcp.2007.07.002
19. Huang W. X., Sung H. J. Three-dimensional simulation of a flapping flag in a uniform flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2010;653:301–336. DOI: 10.1017/S0022112010000248
20. Lantsova I. Numerical simulation of fluid-structure interaction by the example of a flow past a cylinder with a flexible thin structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021;1030(1):012084. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012084
21. Michelin S., Smith S.G.L. Linear stability analysis of coupled parallel flexible plates in an axial flow. *Journal of Fluids and Structures*. 2009;25(7):1136–1157. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2009.06.002
22. Michelin S., Smith S.G.L., Glover B. J. Vortex shedding model of a flapping flag. *Journal of Fluid Mechanics*. 2008;617:1–10. DOI: 10.1017/S0022112008004321
23. Park S.G., Kim B., Sung H.J. Hydrodynamics of a self-propelled flexible fin near the ground. *Physics of Fluids*. 2017;29(5):051902. DOI: 10.1063/1.4983723
24. Quinn D.B. et al. Unsteady propulsion near a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014;742:152–170. DOI: 10.1017/jfm.2013.659
25. Quinn D.B., Lauder G.V., Smits A.J. Flexible propulsors in ground effect. *Bioinspiration & biomimetics*. 2014;9(3):036008. DOI: 10.1088/1748-3182/9/3/036008
26. Schouveiler L., Eloy C. Coupled flutter of parallel plates. *Physics of fluids*. 2009;21(8):081703. DOI: 10.1063/1.3204672
27. Shelley M. J., Zhang J. Flapping and bending bodies interacting with fluid flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2011;43(1):449–465. DOI: 10.1146/annurev-fluid-121108-145456
28. Shelley M., Vandenberghe N., Zhang J. Heavy flags undergo spontaneous oscillations in flowing water. *Physical review letters*. 2005;94(9):094302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.094302
29. Taneda S. Waving motions of flags. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1968;24(2):392–401. DOI:10.1143/JPSJ.24.392
30. Tian F. B. et al. An efficient immersed boundary-lattice Boltzmann method for the hydrodynamic interaction of elastic filaments. *Journal of computational physics*. 2011;230(19):7266–7283. DOI: 10.1016/j.jcp.2011.05.028
31. Tian F.B. et al. Coupling modes of three filaments in side-by-side arrangement. *Physics of Fluids*. 2011;23(11):111903. DOI: 10.1063/1.3659892
32. Tian F.B. Role of mass on the stability of flag/flags in uniform flow. *Applied Physics Letters*. 2013;103(3):034101. DOI: 10.1063/1.4813006
33. Tian F., Lu X., Luo H. Onset of instability of a flag in uniform flow. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2012;2(2):022005. DOI: 10.1063/2.1202205
34. Wang S., He G., Zhang X. Self-propulsion of flapping bodies in viscous fluids: recent advances and perspectives. *Acta Mechanica Sinica*. 2016;32(6):980–990. DOI: 10.1007/s10409-016-0578-y
35. Zhang C., Huang H., Lu X. Y. Free locomotion of a flexible plate near the ground. *Physics of Fluids*. 2017;29(4):041903. DOI: 10.1063/1.4981778
36. Zhang J. et al. Flexible filaments in a flowing soap film as a model for one-dimensional flags in a two-dimensional wind. *Nature*. 2000;408(6814):835–839. DOI: 10.1038/35048530
37. Zhu L., Peskin C. S. Drag of a flexible fiber in a 2D moving viscous fluid. *Computers & fluids*. 2007;36(2):398–406. DOI:10.1016/j.compfluid.2006.02.002
38. Zhu L., Peskin C. S. Interaction of two flapping filaments in a flowing soap film. *Physics of fluids*. 2003;15(7):1954–1960. DOI: 10.1063/1.1582476
39. Zhu L., Peskin C. S. Simulation of a flapping flexible filament in a flowing soap film by the immersed boundary method. *Journal of Computational Physics*. 2002;179(2):452–468. DOI: 10.1006/jcph.2002.7066

Творческие концепции архитектурной деятельности

Научная статья

УДК 721.001

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/141-154>

М.А. Матвеева, А.В. Копьёва, О.В. Масловская

МАТВЕЕВА МАРИЯ АЛЕКСЕЕВНА – магистрант, androuser01121997@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-5269-0731>

КОПЬЁВА АЛЛА ВАСИЛЬЕВНА – кандидат архитектуры, профессор,
профессор Департамента архитектуры и дизайна, koreva.av@dvfu.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-1055-0909>

МАСЛОВСКАЯ ОКСАНА ВЛАДИМИРОВНА – кандидат архитектуры, доцент,
профессор Департамента архитектуры и дизайна, oxum69@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0003-0315-4980>

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Экспериментальный проект архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра в г. Якутск

Аннотация. Рассматривается архитектурно-пространственная среда межпоколенческого центра на примере г. Якутск. Целью работы является апробация выявленных ранее принципов, архитектурно-планировочных приёмов, функционально-пространственных моделей в процессе экспериментального проектирования архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра в г. Якутск. В данном исследовании определены критерии выбора участка проектирования, проведен предпроектный анализ территории, выполнено экспериментальное проектное предложение архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра в г. Якутск.

Ключевые слова: межпоколенческая среда, межпоколенческие отношения, архитектурно-пространственная среда

Для цитирования: Матвеева М.А., Копьёва А.В., Масловская О.В. Экспериментальный проект архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра в г. Якутск // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 141–154.

Введение

Актуальность данного исследования обусловлена рядом различных факторов.

Во-первых, это изменение возрастной структуры населения в современном мире. Например, анализ возрастной структуры проживающих в Якутске, проведенный авторами [5], показал, что в настоящее время в Якутске происходит увеличение численности детей и пожилых людей. Систематизация данных о социальных учреждениях Якутска позволила установить, что лишь 14% подобных учреждений предназначены для пожилых людей [5]. Эти данные позволяют сделать вывод о том, что для г. Якутск характерна возрастная асимметрия, при которой доступ к выгодам и ресурсам имеет лишь подрастающее поколение.

Во-вторых, главным условием развития и функционирования общества, поддержания его стабильности в настоящем и будущем становится социальное взаимодействие [1]. Обеспечению социального взаимодействия разновозрастных групп населения может способствовать формирование межпоколенческой среды – среды, в которой дети и пожилые люди совместно получают социальные услуги и имеют возможность общаться [2, 6, 7]. За рубежом подобную

среду/учреждения называют “Intergenerational Shared Site/Space” (IGSS), что переводится как «межпоколенческая объединённая территория/среда» [11]. «Межпоколенческая объединённая среда – это программы, в рамках которых дети и/или молодежь и пожилые люди могут получать социальные услуги вместе на одной территории, и где участники регулярно взаимодействуют при помощи организованных межпоколенческих мероприятий и через неформальные встречи» [10]. Основная задача такой среды – создание необходимых условий для обеспечения максимально полного удовлетворения общественных потребностей граждан в лечебно-профилактических, оздоровительных, социально-адаптационных мероприятиях, для укрепления здоровья, повышения физической активности, а также нормализации психического статуса с помощью творческих процессов, трудотерапии, игр и формирования взаимоподдерживающих отношений [4].

Цель исследования – апробация выявленных ранее принципов, архитектурно-планировочных приёмов [4] и концептуальной модели [3] в процессе экспериментального проектирования архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра в г. Якутск. Объект исследования – архитектурно-пространственная среда межпоколенческого центра. Предмет исследования – архитектурно-планировочные, объемно-пространственные и архитектурно-художественные особенности архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра.

Материалы, методы и результаты исследования

На этапе постановки цели и задач исследования и определения её связи с важными научными и социальными проблемами, был проведен анализ теоретических концепций исследователей, занимавшихся следующими вопросами формирования межпоколенческой среды: особенности проектирования жилых зданий для всех возрастных групп [8, 9, 12]; влияние пространственной структуры зданий на взаимодействие поколений [14]; формирование межпоколенческо-коммуникативной среды [13]; реновация городской среды для детей, пожилых людей и маломобильных групп населения (МГН) [2, 6, 7]; проектирование архитектурно-пространственной среды межпоколенческих центров [3, 4]. На этапе оценки состояния среды участка проектирования использовались следующие методы: наблюдение, фотофиксация, описание функциональных и эстетических характеристик. Предпроектные исследования послужили основой для применения метода экспериментального проектирования и создания проектных предложений архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра в г. Якутск.

В результате исследования определены критерии выбора территории для создания межпоколенческой среды. Проведен комплексный предпроектный анализ территории города и выбранного участка проектирования. Результаты предпроектного анализа послужили основанием для разработки экспериментального проекта межпоколенческого центра в г. Якутск.

Обсуждение результатов

Критерии выбора территории для создания межпоколенческой среды. На основе обзора теоретических исследований авторами сформулированы четыре основных критерия:

1. *Связь с социальными учреждениями.* Межпоколенческая среда может формироваться на основе существующих социальных учреждений (детские сады, школы, дома-интернаты, реабилитационные центры, центры социального обслуживания и т.д.) методом добавления новых функций в однопрофильные социальные учреждения, а также с помощью проектирования новых центров в пешей доступности от таких учреждений.

2. *Связь с жилой застройкой.* Межпоколенческая среда подразумевает объединение людей, поэтому необходимо обеспечение доступности территории для большого количества людей за небольшой промежуток времени.

3. *Связь с системой общественных пространств города.* Такая связь способствует объединению большого количества людей и включению в эту общность непосредственных пользователей социальных учреждений.

4. *Связь с зелёным каркасом города.* Природное окружение оказывает высокий терапевтический эффект и улучшает состояние здоровья пожилых людей и детей, представления о природе занимают особое место в картине мира жителей Якутии.

Выбор участка проектирования. Анализ территории Якутска по названным критериям позволил определить место для проектирования межпоколенческого центра – участок в северо-западной части города площадью 7,8 га. В соответствии со схемой землепользования и застройки Якутска участок относится к общественно-деловой зоне и предназначен для размещения специализированных общественно-деловых объектов, преимущественно объектов здравоохранения и социального назначения.

Участок имеет непосредственную связь с социальными учреждениями. На территории и в пешей доступности от здания государственного бюджетного учреждения «Республиканский центр содействия семейному воспитанию» и автономного учреждения «Республиканский дом-интернат для престарелых и инвалидов им. В.П. Решетникова». На расстоянии 500 м от участка находится средняя школа № 27 и в 600 м – детский сад № 30. Территория проектирования расположена в Октябрьском районе города в непосредственной близости от 17 жилого квартала, хорошо связана с системой общественных пространств и включена в зелёный каркас города. В пешей доступности от выбранного участка находятся: лесопарковый массив площадью 51 га, детский сад, школа, дом престарелых и дом ребенка. С восточной и западной сторон участок ограничен жилой застройкой, с юго-восточной к нему примыкают объекты здравоохранения, с юга – лесопарковая зона.

Анализ территории участка проектирования. Для выявления локальных особенностей участка проектирования был проведен комплексный анализ его территории. Определены средние значения доступности территории для пешеходов и транспорта (рис. 1).

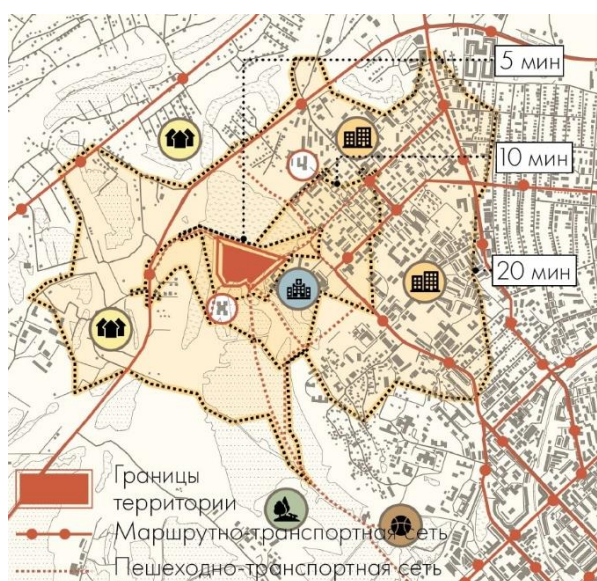


Рис. 1. Схема транспортно-пешеходной доступности

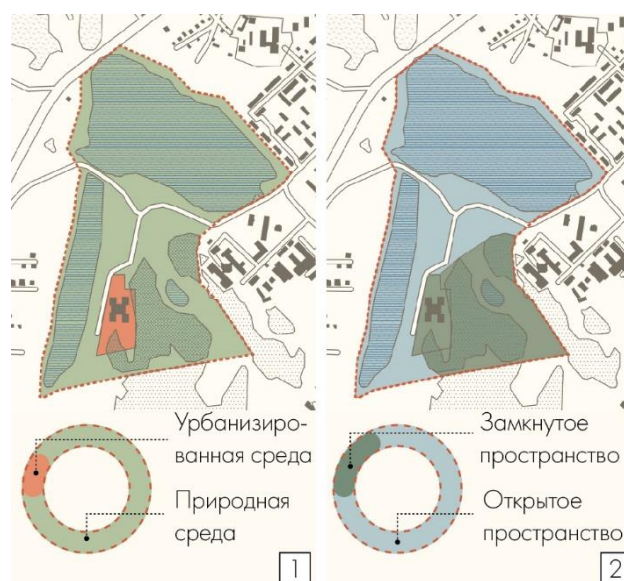


Рис. 2. Планировочные схемы морфологического строения среды: 1 – соотношение природной и урбанизированной среды; 2 – соотношение открытого и закрытого пространств

Ближайшее к участку общественное пространство – парк, находится в 5–10 минутах ходьбы. Доступность участка от центра города на автотранспорте составляет 15 минут. Территория имеет хорошую связь с окружающей застройкой: за 10 минут движения на автомобиле сюда может добраться более 50% жителей Якутска, а изохрона получасовой доступности охватывает практически весь город. Ближайшие остановки находятся на расстоянии 800 м, что несколько снижает доступность на общественном транспорте. Изохрона 15-минутной пешей

доступности охватывает весь Октябрьский район, большую часть жилой зоны 17 квартала, зону здравоохранения и парковую территорию. Изохорна 30-минутной транспортной доступности охватывает всю территорию города, что свидетельствует о высокой связи участка со всем населением города.

Анализ соотношения природной и урбанизированной среды участка проектирования, а также соотношения открытой и закрытой среды позволили определить пригодность данной территории для размещения межпоколенческого центра (рис. 2).

Основную часть участка проектирования составляют природные элементы: озеро Белое и лесопарковый массив. Урбанизированная среда представлена объектами здравоохранения. В теплое время года пешеходными связями между зонами служат тротуары вдоль ул. Пионерская; в зимний период – тропинки, проложенные по озеру, покрытому льдом, а в течение всего года – многочисленные прогулочные дорожки в лесном массиве.

Рельеф участка проектирования плоский. Озеро Белое состоит из двух водоемов, разделенных ул. Пионерская. Озеро проточное, входит в систему городских озёр и реки Лена. Берега озера пологие, невысокие, покрытые тростником. В озере водится мелкая рыба - голянь и карась. Флора лесопарковой зоны представлена в основном даурской лиственницей и сосной с незначительными в общей массе вкраплениями других пород: елей, берёз, осин и др. В юго-восточной и юго-западной части лесного массива преобладает молодняк высотой 1,0–1,5 м. Основные представители фауны – белки, воробьи и голуби.

Анализ восприятия природной и антропогенной среды исследуемой территории выявил горизонтальный, открытый характер составляющих её пространств (рис. 3). С северо-западной обзорной точки участок проектирования находится на стыке урбанизированной и природной зон города. С этой точки открывается протяженный панорамный вид на сопки.



Рис. 3. Схема морфологического строения среды:

- 1 – схема визуального восприятия территории; 2 – горизонтальное строение пространства; 3 – плановость пространства; 4 – вертикальное строение пространства; 5 – наличие инженерных сетей; 6 – объединение природной и урбанизированной среды города**

Территория характеризуется низкой функциональной насыщенностью. Большая часть активностей приходится на лесопарковую зону, где люди занимаются бегом, катаются на лыжах, совершают пешие прогулки, собирают грибы. Озеро используется лишь в холодный период года – зимой и весной. Жители близлежащего района используют замерзшую поверхность озера для лыжных прогулок и катания на коньках. Ежегодно весной на озере проходят ледовые автогонки «Полярная звезда». Однако воспитанники и постояльцы Центра содействия семейному воспитанию и Дома-интерната для престарелых и инвалидов не имеют возможности участвовать в социальной жизни города.

Таким образом, территория проектирования межпоколенческого центра обладает высоким потенциалом для того, чтобы претендовать на роль крупного городского общественного пространства и в перспективе в совокупности с лесопарком может рассматриваться как часть территории парка культуры и отдыха. В проектную разработку предложено включить прибрежные участки примыкающего водоема, лесопарк, мост, пролегающий через озеро и соединяющий межпоколенческий центр с домом-интернатом для престарелых.

Экспериментальное проектное предложение (рис. 4). Экспериментальный проект архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра в г. Якутск выполнен на основе выявленных ранее принципов, архитектурно-планировочных приёмов [4] и концептуальной модели межпоколенческого центра [3].



**Рис. 4. Панорама межпоколенческого центра в г. Якутск.
Проектное предложение**

Общая характеристика объекта. Территория межпоколенческого центра рассчитана на одновременное посещение 1000 человек. Вместимость здания – 300 мест (150 мест для детей и 150 – для пожилых людей), включая 36 мест для постоянного проживания пожилых людей. Основные категории пользователей межпоколенческого центра – дети в возрасте до 14 лет и полностью самообслуживаемые люди пенсионного возраста. Площадь участка составляет 7,8 га, площадь застройки – 0,82 га.

Архитектурно-градостроительное решение территории межпоколенческого центра (рис. 5). Композиционные оси здания межпоколенческого центра отвечают средовому контексту и продолжают осевые направления, заданные градостроительным окружением: зданием Центра социального содействия семейному воспитанию и зданием Дома-интерната для престарелых и инвалидов, находящимся за озером. Для лучшей пешеходной доступности и связности объектов проектом предусмотрен мост через озеро.



Рис. 5. Проектное решение территории межпоколенческого центра в г. Якутск

В связи с тем, что на данный момент территория функционально не насыщена, для раскрытия ее потенциала необходимо создать условия, способствующие реализации различных видов деятельности:

- прогулки по лесопарковой территории и набережной вдоль озера;
- занятия спортом на детских и спортивных площадках, памп-треке, велодорожках, в скейтпарке и т.д.;
- спокойный отдых в компании;
- проведение массовых мероприятий;
- познавательные маршруты в природной среде;
- садоводство.

На территории межпоколенческого центра выделены функциональные зоны: тихого отдыха, активного отдыха, культурно-просветительских мероприятий, административно-хозяйственная, входная, массовых мероприятий, физкультурно-оздоровительная.

Зона тихого отдыха занимает 40% территории, основная часть которой представлена лесопарковым массивом и набережной вдоль озера Белое. Проектом предусмотрено восстановление экологического баланса озера. Посадка растений для организации мест обитания животных и птиц, стимулирование проточности водной системы и регулирование ливневого стока позволят улучшить экологическую ситуацию в городе. Предусмотрено укрепление берега, фильтрация стоков посредством сохранения массива тростника, служащего местом гнездования птиц. В теплое время года использование набережной в значительной степени определяется ее природной составляющей: наблюдения за птицами и водными животными становятся самостоятельным видом досуговой деятельности. Зимой эта составляющая исчезает, и после ледостава водное зеркало озера трансформируется в городскую площадь. На ней организованы катки, а на прибрежной полосе устанавливаются отапливаемые укрытия и торговые павильоны. Набережная может использоваться круглогодично, в зимнее время поверх беговых и велодорожек прокладываются лыжные тропы. Проектом предусмотрено благоустройство набережной по всему периметру озера: организованы подходы к кромке воды, проложены экотропы для спокойных прогулок и наблюдения за приозерной флорой и фауной, сформирована велопешеходная инфраструктура. В узловых точках созданы мини-скверы и мини-площади. Высокий уровень функционального наполнения и разнообразие видов деятельности делают набережную центром рекреационной активности.

Вдоль берега озера, в его западной части, размещены теплицы и зона садово-огородной деятельности. В настоящее время неблагоприятные почвенно-климатические условия, усложняющие уход за растениями, и отсутствие современного питомника посадочного материала снизили качество озеленения в Якутске. Участки садово-огородной зоны на территории межпоколенческого центра могут арендоваться горожанами для собственного огорода, а также служить местом, где основные группы пользователей центра могут заниматься выращиванием цветов, кустарников и деревьев для благоустройства города. Запроектированная оранжерея разделена на две части: в одной размещены стеллажи для гидропонного выращивания овощей и зелени, в другой – растения, включая экзотические, которые выращиваются в грунте. Помещения оранжереи могут использоваться для проведения лекций, мастер-классов, тематических мероприятий, посвященных различным способам выращивания растений: в открытом и закрытом грунте и с использованием гидропоники.

Зона активного отдыха занимает 10% территории, включает различные игровые площадки, которые дают возможность для физических, сенсорных и социальных игр. Для обеих возрастных групп пользователей межпоколенческого центра актуальны мероприятия, включающие аэробику, балансирование, растяжку, разминку, укрепление мышц и развитие мелкой моторики. Дети предпочитают сюжетно-ролевые игры. К межпоколенческим видам активности относятся катание на качелях, каруселях, игры с песком и водой, игра на музыкальных инструментах, балансирование, лазание, прыжки, раскачивание, ползание, управление, скольжение, вращение. На игровых площадках используются элементы, благодаря которым задействуются осязание, обоняние, зрение и слух.

Зона культурно-просветительских мероприятий – 15% территории, предназначена для размещения выставочных павильонов, объектов общественного питания, читален, помещений для любительских занятий, лекториев. Благодаря тому, что основной объем здания размещается над уровнем земли на колоннах высотой в 5 метров, данная зона находится под зданием межпоколенческого центра. В летний сезон под зданием могут проводиться мастер-классы, обучение на свежем воздухе, различные встречи и др.

Административно-хозяйственная зона – 2% территории, где располагаются хозяйственные площадки, административные сооружения.

Входная зона – 8% территории, расположена в восточной части участка проектирования. Здесь размещаются автопарковка для посетителей на 80 мест, информационные стенды, прокат средств передвижения.

Зона массовых мероприятий – 15% территории. Находится перед главным входом в здание и представляет собой главную площадь, где проводятся все крупные общественные мероприятия, праздники, конкурсы и фестивали. Территория имеет высокую рекреационную нагрузку – более 100 человек на 1 га. Поэтому здесь использованы приемы благоустройства, снижающие негативное влияние большого количества посетителей на природное окружение: предусмотрены аллеи и дорожки для передвижения, приподнятые цветники в виде боскетов, освещение. Ближе к мосту располагаются фудкорт, точка проката передвижных средств и ярмарочные киоски. Перед мостом установлен фонтан.

Физкультурно-оздоровительная зона – 10% территории, на которой размещены физкультурно-оздоровительные сооружения: площадки для волейбола, баскетбола, бадминтона, настольного тенниса, многофункциональная спортивная площадка, каток, пункт проката, объекты общественного питания, туалеты, беговые и велодорожки. Ось, проведенная от правого крыла здания, ведет к внутренней площади, которая может использоваться как для общественных и спортивных мероприятий, так и для активного отдыха. Рядом расположены спортивные площадки, воркаут-площадки и скейтпарк.

На пути следования пешеходов установлены скамьи, урны, отопливаемые остановки и павильоны для кратковременного отдыха. Для всей территории межпоколенческого центра разработана одна линейка малых архитектурных форм из натуральных материалов.

Объемно-планировочное решение здания межпоколенческого центра (рис. 6).



Рис. 6. Проектное предложение здания межпоколенческого центра в г. Якутск

На основании предпроектного анализа территории сделан вывод о том, что в условиях Якутска следует использовать модель межпоколенческого центра, в котором помещения для детей находятся в одном здании с помещениями для пожилых людей. Эта модель является наиболее распространенной в мировой практике [4]. Здание досугового центра для пожилых людей и центра дошкольного и школьного дополнительного образования с открытым доступом рассчитано на 300 посетителей (150 детей и 150 пожилых людей), жилой блок – на 36 пожилых людей. В здании межпоколенческого центра предусмотрены следующие группы помещений: кружково-учебные, культурно-зрелищные, административно-хозяйственные; входная группа с информационным блоком; медицинский блок; спортивный блок; пищеблок (рис. 7).

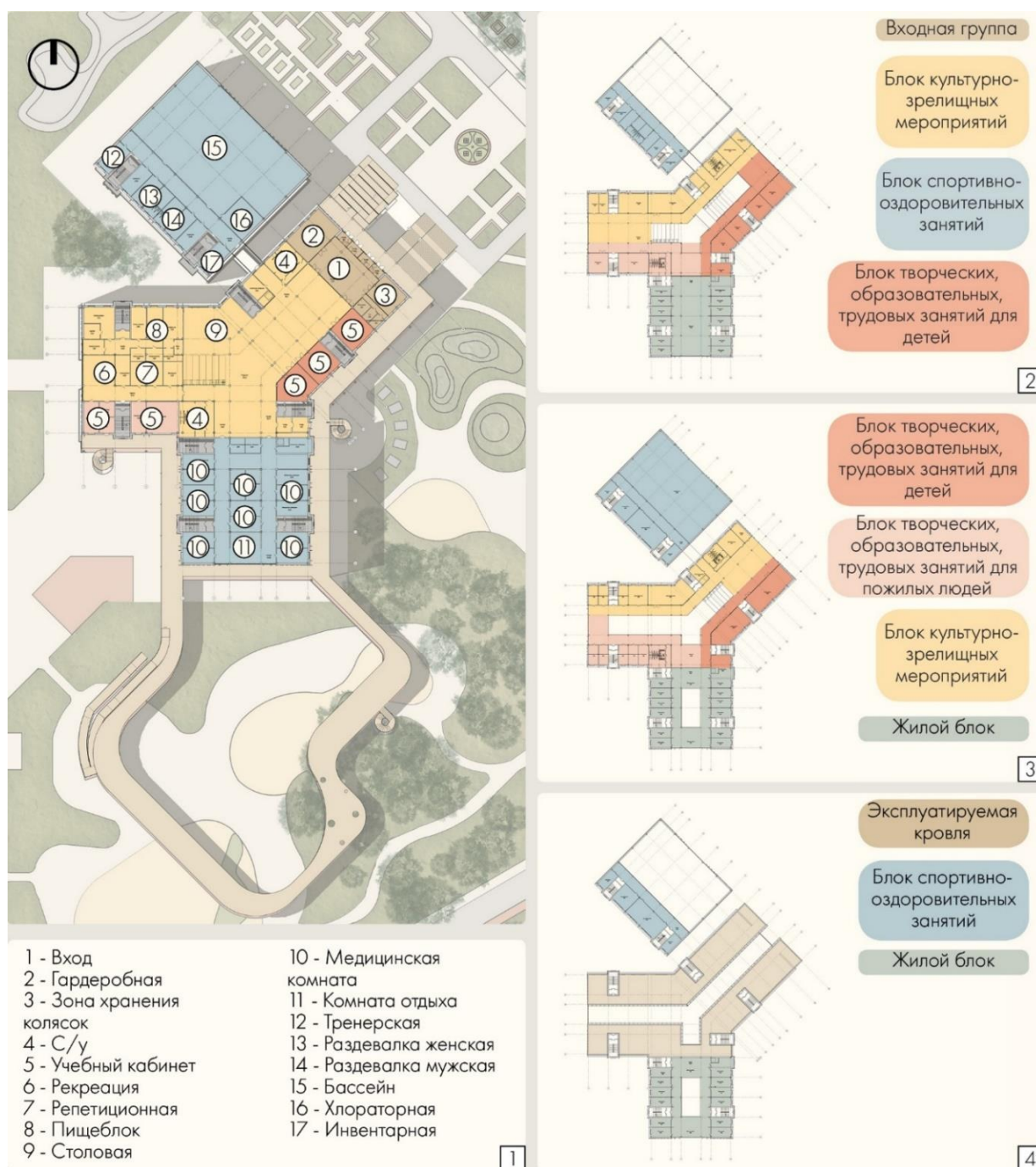


Рис. 7. Планы здания межпоколенческого центра:
 1 – план на отметке 0,000; 2 – план на отметке +3,300; 3 – план на отметке +6,600;
 4 – план на отметке +9,900

Композиционное решение здания межпоколенческого центра отражает концепцию объединения поколений. Здание состоит из двух параллельных объемов, соединенных между собой протяженным коридором-атриумом. Здание приподнято на 5 метров над поверхностью земли в целях предотвращения таяния грунта, что позволяет использовать образующееся пространство между поверхностью земли и зданием. Высота основного объема здания в четыре этажа обеспечивает доступность различных уровней и позволяет соблюсти требования эвакуационной безопасности для маломобильных пользователей.

Входная группа заглублена в основной объем здания, перед ней размещена высокая парадная лестница, используемая в качестве амфитеатра. Площадь входной зоны увеличена с целью устройства рекреации: просторное фойе не только выполняет транзитную функцию, но и служит местом отдыха. Пространство фойе связано со всеми группами помещений. Наличие визуальной связи фойе с внутренними помещениями способствует взаимодействию людей. Несмотря на большую площадь, достигается ощущение комфорта и уюта благодаря грамотному разграничению фойе на небольшие зоны, пространство которых доступно для социального взаимодействия: дружеских посиделок детей и пожилых людей, настольных игр, неформальных лекций. Такая пространственная организация позволяет устанавливать межличностные отношения и в то же время не терять связь с сообществом.

Трёхэтажный атриум с расположенными по периметру галереями выполняет транзитную функцию и служит местом спонтанных встреч и взаимодействия поколений. В атриумном пространстве расположены: игровая площадка, репетиционное пространство, место для представлений со сценой, оборудованной для выступлений и кинопоказов. Помещения, расположенные по периметру атриума, играют роль зданий вдоль улицы, объединяющей несколько поколений под одной крышей (рис. 8).



Рис. 8. Атриумное пространство в структуре здания межпоколенческого центра

Зона для пожилых людей представлена учебно-кружковыми помещениями и жилыми ячейками, расположенными вокруг многоуровневого атриума. Окна жилых комнат ориентированы на восток и запад. В зимнем саду на первом уровне атриума пожилые люди могут заниматься садоводством, отдыхать за чтением книг и общаться.

В правом крыле здания расположены учебно-кружковые помещения, которые имеют южную ориентацию. Художественный класс, информационный центр и библиотека ориентированы на север. Все помещения объединены многоуровневым пространством. Вертикальные

связи осуществляются с помощью лестниц и лифтов, а также дублируются амфитеатром. Зона детского дополнительного образования размещена на втором этаже атриумного пространства. На первом этаже под ней находятся классы для занятий в межпоколенческих группах.

Запланированные мероприятия предполагается проводить в различных крупных пространствах залов – точках притяжения. На пути к ним возможны случайные спонтанные встречи и взаимодействия. Поэтому транзитные коридоры и галереи спроектированы широкими, с местами для отдыха. Здесь есть возможности для небольших взаимодействий, обозрения других зон и кратковременного отдыха. Вдоль путей размещены поручни в двух уровнях – для детей на высоте их роста и для пожилых – чуть выше.

Проектная реализация основных принципов формирования архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра в Якутске. С помощью экспериментального проекта (рис. 9) авторами были уточнены сформулированные в предыдущих исследованиях принципы формирования архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра [3, 4], предусматривающие создание: 1) комфортной и безопасной среды; 2) доступной среды; 3) гармоничной взаимосвязи архитектуры и природного окружения; 4) многофункциональной среды; 5) постепенного перехода от частных пространств к публичным; 6) социопетальной среды.

Первый принцип – создание комфортной и безопасной среды, – достигается благодаря использованию следующих приемов:

- домашняя атрибутика в интерьере (картин, мягкой мебели, ковров и т.д.) и предоставление возможности вносить свои изменения в пространство жилых помещений способствуют развитию эмоциональной привязанности к среде и, как следствие, формированию чувства комфорта и ощущения безопасности;

- тёплые цветовых оттенки также создают уютную и привлекательную атмосферу в течение продолжительного холодного времени года;

- полуоткрытые пространства, разделяемые при помощи проницаемых ограждений, стоек, колонн, вертикального озеленения, создают благоприятную среду для пребывания людей, позволяют обозначить границы пространств, предоставляют возможность видеть происходящее и удовлетворять потребность в необходимом контроле за окружением.

Второй принцип – создание доступной среды, нашел отражение в следующих планировочных приемах:

- применение простого пространственного решения, при котором на одну ось «нанизываются» основные блоки помещений;

- организация доступной среды для маломобильных групп населения: применение пандусов, отсутствие перепадов высот и порогов, расширение дверей, коридоров и иных коммуникационных пространств;

- формирование визуальной доступности благодаря применению проницаемых границ различных функциональных зон. Для лучшей ориентации в пространстве используются различные материалы, цвета и текстуры для обозначения зон. При разработке объемно-планировочного решения учтены особенности двух возрастных групп пользователей – детей и людей пожилого возраста. Ярким цветом, одинаково воспринимаемым обеими возрастными группами, выделены фокусные точки, являющиеся ориентирами в пространстве. Навигация во внутреннем пространстве обеспечивается в силу того, что функциональные зоны, предназначенные для детей, выделены ярким цветом на уровне глаз ребенка, а функциональные зоны для пожилых людей, имеющих ограничения зрения и различения цвета, выделяются благодаря использованию различных материалов, текстур, игры света и тени.

Третий принцип – взаимосвязь архитектуры и природного окружения. Для этого требуется:

- создание атриумного пространства, которое благодаря панорамному остеклению связано с внешним природным окружением;

- использование природных элементов в интерьере;

- применение эксплуатируемой зеленой кровли;

- архитектурно-художественное решение фасадов с использованием вертикальных конструкций, переключаящихся со стволами сосен в окружающем лесу;
- создание пешеходного моста, связывающего здание с лесопарковой зоной.

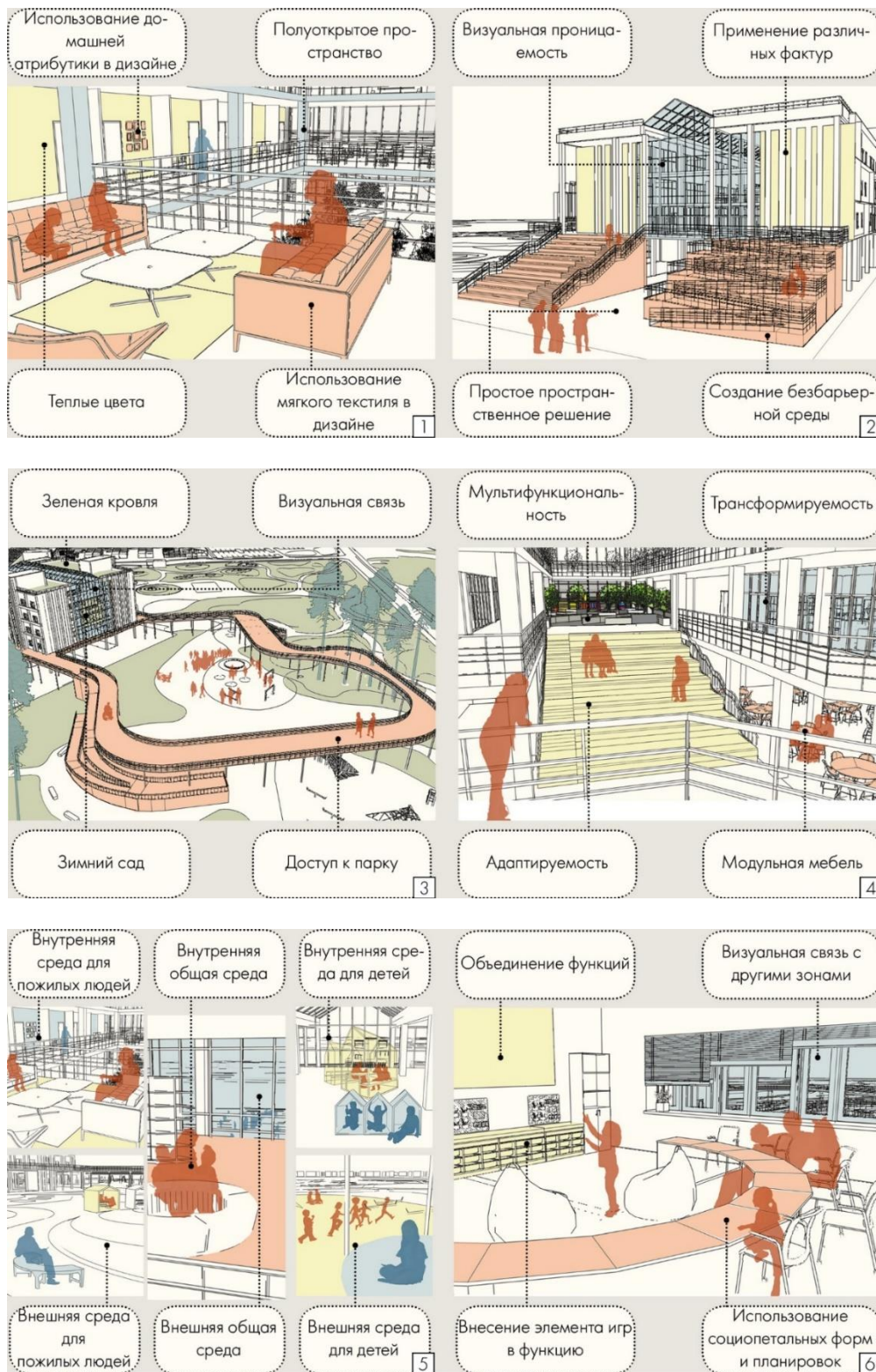


Рис. 9. Принципы формирования архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра в г. Якутск:

- 1 – создание комфортной и безопасной среды; 2 – организация доступной среды;**
- 3 – взаимосвязь архитектуры и природного окружения; 4 – формирование многофункциональной среды;**
- 5 – градация степени приватности и публичности пространств; 6 – создание социопетальной среды**

Четвертый принцип – создание многофункциональной среды. Для его реализации необходимо:

- смешение функций в одном пространстве: лестница, соединяющая этажи и расположенная в амфитеатре, является и общественным пространством, и средством коммуникации;
- использование модульной мобильной мебели, позволяющей трансформировать пространство под различные сценарии использования;
- трансформация учебных помещений под различные формы обучения: стены, разделяющие рекреацию и класс, соседние кабинеты, в зависимости от сценария, могут сдвигаться и раздвигаться, создавая помещения для занятий в больших группах.

Пятый принцип – градация степени приватности и публичности пространств. Подразумевает многоуровневую иерархию пространств – от общественных и полупубличных до полуприватных и приватных. Пространства различаются размерами и степенью визуальной и шумовой проницаемости. Этот принцип реализуется путем создания визуальных и физических границ и установления дистанции между пространствами. Зона для пожилых людей находится в правом блоке, для детей – в центральном. Учебные помещения отделены от общих рекреаций колоннами. В жилых блоках устроены полупубличные галереи, расположенные по обеим сторонам центрального атриума, и полуприватные зоны входов в жилые помещения. Применение принципа градации степени приватности и публичности пространств способствует организации разнообразных вариантов социального взаимодействия пользователей.

Шестой принцип – создание социопетальной среды предполагает:

- создание общих зон для детей и пожилых людей, организованных таким образом, чтобы люди в них могли сидеть лицом друг к другу;
- придание общим зонам квадратной или круглой формы и негабаритных размеров;
- обеспечение визуальной связи общих зон с другими пространствами, для повышения возможностей случайных встреч;
- использование игровых элементов для повышения привлекательности общих зон, предназначенных для детей.

Заключение

Формирование межпоколенческой среды, в которой дети и пожилые люди совместно получают социальные услуги и взаимодействуют, может стать ответом на негативные социокультурные изменения современного общества. В данной работе представлен экспериментальный проект архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра в г. Якутск. Сформулированы критерии выбора территории, проведен предпроектный анализ участка проектирования. Определены состав и площадь функциональных зон генерального плана и здания межпоколенческого центра, представлено описание архитектурно-пространственных, функционально-планировочных, архитектурно-художественных решений экспериментального проекта. Данная работа может служить основой для дальнейших теоретических поисков в выбранной области, а также моделью для создания проектов межпоколенческих центров в других российских городах, находящихся в суровых природно-климатических условиях.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кияненко К.В. Общество, среда, архитектура. Вологда: ВоГУ, 2015. 284 с.
2. Кузьмина Е.А. Перспективы внедрения технологии включения пожилых людей в социализацию выпускников детских домов // Logos et Praxis. 2018. № 2. С. 123–132.
3. Матвеева М.А., Копьёва А.В., Масловская О.В. Концептуальная модель архитектурно-пространственной среды межпоколенческого центра в г. Якутск // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2022. № 3(52). С. 123–136.
4. Матвеева М.А., Копьёва А.В., Масловская О.В. Особенности формирования архитектурно-пространственной среды межпоколенческих центров // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2021. № 4(49). С. 106–120.

5. Матвеева М.А., Шегай Л.А. Исследовательская программа формирования межпоколенческой среды в г. Якутске // Новые идеи нового века-2021: материалы 21-й междунар. науч. конф. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2021. Т. 1. С. 359–364.
6. Панченко А.Е., Молчанова К.Э. Архитектура социально-оздоровительных центров для граждан старших возрастных групп // Архитектура и дизайн: история, теория, инновации: материалы шестой междунар. науч. конф., 12–14 апреля 2022, Владивосток, Россия. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2022. С. 109–113.
7. Семенченко Е.И. Опыт архитектурного формирования современной среды жизнедеятельности для нескольких поколений людей, оставшихся на социальном попечении // Актуальные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: материалы VII очной междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Ф.К. Абдразакова. Саратов: Саратовский ГАУ, 2018. С. 251–256.
8. Epimakhova T.E. Designing for multigenerational community: creating a supportive environment for young and old in the U.S.A. Clemson, USA, Clemson University, 2016. 128 p. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/268647129.pdf> – 12.03.2022.
9. Galand E. A multi-generational community. Tampere, Finland, Tampere University of Technology, 2017. 56 p. URL: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/25113> (дата обращения: 12.03.2022).
10. Hatton-Yeo A., Melville J. Intergenerational Shared Spaces. Generations Together Cymru. Cardiff, 2013. URL: <https://generationsworkingtogether.org/downloads/5b361fc82db5bShared%20Site%20final%20Generations%20Together%20Cymru.pdf> – 27.08.2022.
11. Kaplan M., Haider J., Cohen U., Turner D. Environmental Design Perspectives on Intergenerational Programs and Practices. *Journal of Intergenerational Relationships*. 2007;5(2):81–110. DOI: 10.1300/J194v05n02_06
12. Miller D.J. Intergenerational housing: A vernacular perspective. USA, Pennsylvania State University, 2014. 133 p. URL: <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/21811> – 12.03.2022.
13. Norouzi N. Intergenerational Facilities: Designing Intergenerational Space through a Human Development Lens. USA, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2016. 244 p. URL: <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/79848> – 12.03.2022.
14. Seo M. Therapeutic and developmental design: the relationship between spatial enclosure and impaired elder-child social interaction. USA, Texas, College Station, Texas A&M University, 2006. 331 p. URL: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/etd-tamu-1730> – 12.03.2022.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 4/53

Creative Concepts of Architecture Activities

www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/141-154>

Matveieva M., Kopeva A., Maslovskaja O.

MARIIA A. MATVEIEVA, Master Student, androuser01121997@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-5269-0731>

ALLA V. KOP'EVA, Candidate of Architecture, Professor, Professor of the Department of Architecture and Design, kopeva.av@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1055-0909>

OKSANA V. MASLOVSKAIA, Candidate of Architecture, Associate Professor, Professor of the Department of Architecture and Design, oxym69@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0315-4980>
Far Eastern Federal University
 Vladivostok, Russia

Experimental project of the architectural and spatial environment of the intergenerational center in the city of Yakutsk

Abstract. The authors consider the architectural and spatial environment of the intergenerational center on the example of the city of Yakutsk. The purpose of the work is to test the previously identified principles, architectural and planning techniques, functional and spatial models in the process of experimental design of the

architectural and spatial environment of the intergenerational center in Yakutsk. This study defines the criteria for choosing a design site; a pre-project analysis of the territory was carried out; an experimental design proposal for the architectural and spatial environment of the intergenerational center in Yakutsk was completed. *Keywords:* intergenerational space, intergenerational relation, architectural and spatial environment

For citation: Matveeva M., Kopeva A., Maslovskaja O. Experimental project of the architectural and spatial environment of the intergenerational center in the city of Yakutsk. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):141–154. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Kiyanenko K.V. Society, environment, architecture. Vologda: Publishing house of the Vologda State University. 2015. 284 p. (In Russ.).
2. Kusmina E.A. Perspectives of inclusion of elderly people in the sozialization of orphans. *Logos et Praxis*. 2018;(2):123–132. (In Russ.).
3. Matveeva M.A., Kopeva A.V., Maslovskaja O.V. Conceptual model of the architectural and spatial environment of the intergenerational center in the city of Yakutsk. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(3):123–136. (In Russ.).
4. Matveeva M.A., Kopeva A.V., Maslovskaja O.V. Features of the formation of the architectural and spatial environment of intergenerational centers. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2021;(4):106–120. (In Russ.).
5. Matveeva M.A., Shegay L.A. Research program for the formation of an intergenerational environment in Yakutsk. *The New Ideas of New Century-2021: The Twenty First Int. Sci. Conf. Proc.* Khabarovsk, Pacific Nat. University, 2021. Vol. 1. P. 359–364. (In Russ.).
6. Panchenko A.E., Molchanova K.E. Architecture of social and health centers for citizens of older age groups. *Architecture and design: history, theory, innovations: The Sixth Int. Sci. Conf. Proc., 12–14 April, 2022, Vladivostok, Russia*. Vladivostok, Far Eastern Federal University, 2022. P. 109–113. (In Russ.).
7. Semenchenko E.I. Experience of the architectural designing of environment for generations who left in social care. *Actual problems and perspectives of construction, heat and gas supply, energy saving development: The Seventh Int. Sci. and Prac. Conf. Proc.* Saratov, SSAU, 2018. P. 251–256. (In Russ.).
8. Epimakhova T.E. Designing for multigenerational community: creating a supportive environment for young and old in the U.S.A. Clemson, USA, Clemson University, 2016. 128 p. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/268647129.pdf> – 12.03.2022.
9. Galand E. A multi-generational community. Tampere, Finland, Tampere University of Technology, 2017. 56 p. URL: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/25113> – 12.03.2022.
10. Hatton-Yeo A., Melville J. Intergenerational Shared Spaces. Generations Together Cymru. Cardiff, 2013. URL: <https://generationsworkingtogether.org/downloads/5b361fc82db5b-Shared%20Site%20final%20Generations%20Together%20Cymru.pdf> – 27.08.2022.
11. Kaplan M., Haider J., Cohen U., Turner D. Environmental Design Perspectives on Intergenerational Programs and Practices. *Journal of Intergenerational Relationships*. 2007;5(2):81–110. DOI: 10.1300/J194v05n02_06 – 22.08.2022.
12. Miller D.J. Intergenerational housing: A vernacular perspective. USA, Pennsylvania State University, 2014. 133 p. URL: <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/21811> – 12.03.2022.
13. Norouzi N. Intergenerational Facilities: Designing Intergenerational Space through a Human Development Lens. USA, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2016. 244 p. URL: <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/79848> – 12.03.2022.
14. Seo M. Therapeutic and developmental design: the relationship between spatial enclosure and impaired elder-child social interaction. USA, Texas, College Station, Texas A&M University, 2006. 331 p. URL: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/etd-tamu-1730> – 12.03.2022.