

GƏMİÇİLİK VƏ SU NƏQLİYYATININ İSTİSMARI

УДК 656.61.052

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПОЖАРОТУШЕНИЯ НА СУДАХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ФЛОТА, ОСНАЩЁННЫХ СИСТЕМОЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ (DP)

Гулиев Н.Н.

ПЮЛ “Азербайджанская Государственная Морская Академия”

Аз1000, г. Баку, ул. З. Алиевой, 18

E-mail: namiq.1993@gmail.com

Аннотация. В работе выполнен комплексный анализ систем пожаротушения, применяемых на специализированных судах, оснащённых системами динамического позиционирования (DP). Рассмотрены конструктивные и эксплуатационные особенности современных установок водяного тумана, пенных, газовых и химических систем с точки зрения их адаптации к условиям эксплуатации DP-судов на морских нефтегазовых месторождениях. Исследование проведено на примере многоцелевого судна “Ханкенди”, являющегося одним из крупнейших DP судов Каспийского региона, задействованного в подводно-технических операциях на месторождении “Шах-Дениз”. Приведены принципы интеграции систем пожарной сигнализации и пожаротушения с контурами DP-управления и системами аварийного отключения (ESD). Сформулированы критерии эффективности пожарных систем по параметрам времени срабатывания, избыточности, совместимости с энергетической архитектурой судна и уровня безопасности экипажа. На основе сравнительного анализа и практического опыта эксплуатации судна «Ханкенди» предложена оптимальная конфигурация многоуровневой системы пожаротушения, обеспечивающая высокий уровень живучести, функциональную независимость и соответствие международным требованиям SOLAS и DNV.

Abstract. The article provides a comprehensive analysis of fire extinguishing systems used on specialized vessels equipped with dynamic positioning (DP) systems. The design and operational features of modern water mist, foam, gas, and chemical systems are considered in terms of their adaptation to the operating conditions of DP vessels at offshore oil and gas fields. The study was conducted using the example of the multi-purpose vessel “Khankendi”, one of the largest DP vessels in the Caspian region, involved in subsea technical operations at the Shah Deniz field. The principles of integrating fire alarm and fire extinguishing systems with DP control circuits and emergency shutdown systems (ESD) are presented. Criteria for the effectiveness of fire protection systems are formulated in terms of response time, redundancy, compatibility with the vessel's power architecture, and crew safety. Based on a comparative analysis and practical experience of operating the “Khankendi” vessel, an optimal configuration of a multi-level fire extinguishing system is proposed, ensuring a high level of survivability, functional independence, and compliance with international SOLAS and DNV requirements.

Xülasə. Məqalədə dinamik mövqesaxlama (DP) sistemi ilə təchiz olunmuş ixtisaslaşdırılmış gəmilərdə tətbiq olunan yanğınsöndürmə sistemlərinin kompleks təhlili aparılmışdır. Müasir su dumanı, köpük, qaz və kimyəvi yanğınsöndürmə qurğularının konstruktiv və istismar xüsusiyyətləri onların dəniz neft-qaz yataqlarındakı DP gəmilərinin iş şəraitinə uyğunluğu baxımından araşdırılmışdır. Təhlil, Xəzər regionunun ən böyük DP gəmilərindən biri olan və “Şahdəniz” yatağında sualtı texniki əməliyyatlarda istifadə olunan müxtəlif təyinatlı “Xankəndi” gəmisi

nümunəsində həyata keçirilmişdir. Yanğın aşkarlama və yanğınsöndürmə sistemlərinin DP idarəetmə konturları və fövqəladə dayandırma sistemləri (ESD) ilə integrasiya prinsipləri təqdim edilir. Yanğınsöndürmə sistemlərinin səmərəliliyinin qiymətləndirilməsi üçün cavabvermə vaxtı, ehtiyatlılıq dərəcəsi, gəminin enerji və DP arxitekturası ilə uyğunluq səviyyəsi və heyətin təhlükəsizliyi kimi meyarlar formalaşdırılmışdır. “Xankəndi” gəmisinin istismarı zamanı əldə olunmuş təcrübə və aparılan müqayisəli təhlil əsasında çoxsəviyyəli yanğınsöndürmə sisteminin optimal konfigurasiyası təklif edilir ki, bu konfigurasiya yüksək dayanıqlığı, funksional müstəqilliyi təmin edir və SOLAS və DNV beynəlxalq tələblərinə tam cavab verir.

Ключевые слова: динамическое позиционирование, пожарная безопасность, судно, морская техника, авария, вероятность, эффективность

Key words: dynamic positioning, fire safety, vessel, marine engineering, accident, probability, efficiency

Açar sözlər: dinamik mövqe saxlama, yanğın təhlükəsizliyi, gəmi, dəniz texnikası, qəza, ehtimal, səmərəlilik

Введение. Безопасность эксплуатации специализированных судов, выполняющих подводно-технические и вспомогательные операции на морских нефтегазовых месторождениях, является одной из приоритетных задач современной морской инженерии. Повышенная насыщенность энергоёмких оборудования, наличие топлива и сложных электрогидравлических систем создают высокий риск возникновения пожара на борту [1].

Особенно остро эта проблема проявляется на судах, оснащённых системой динамического позиционирования (DP), которые при выполнении операций удерживаются в фиксированной позиции и не могут оперативно покинуть опасную зону. Любое возгорание в этом случае может привести к нарушению позиционирования, сбою системы DP и угрозе столкновения с нефтегазовой платформой.

В связи с этим системы пожаротушения на DP-судах должны обладать особыми характеристиками: высокой степенью автоматизации, независимым энергопитанием, функциональной избыточностью и интеграцией с контурами DP и ESD (система аварийного отключения).

Основная часть. Практическая часть исследования выполнена на примере судна “Ханкенди”, построенного в 2017 году на верфи Бакинского судостроительного завода при участии SOCAR и BP для подводно-технических работ в рамках проекта “Шах-Дениз”. Судно имеет класс DP-3, что обеспечивает тройное резервирование всех критически важных систем, включая пожарную защиту [2].

На борту судна установлены: система пожарной сигнализации “Minerva T-2000”, противопожарные системы Water Mist X-Flow (водяной туман под давлением), Dive Salt water deluge system (спринклерная система), газовая система Novac 1230, пенная AFFF 1%, а также локальные химические установки для камбуза Wet chemical (химическое огнетушащее средство, реагирует с раскалённым жиром, превращая его в мыльную пену). Это делает «Ханкенди» эталонной платформой для анализа эффективности современных систем пожаротушения на DP-судах.

Целью исследования является оценка эффективности различных типов систем пожаротушения с учётом специфики DP-архитектуры, режимов работы, временных параметров срабатывания и влияния на устойчивость судна при аварийных сценариях.

Классификация судовых систем пожаротушения. Современные специализированные суда снабжения и технической поддержки нефтегазовых объектов оснащаются несколькими типами противопожарных систем (табл.1), различающихся по используемому огнетушащему агенту, конструкции и назначению [3].

Таблица 1

Классификация и сравнительная характеристика систем пожаротушения

№	Тип системы	Агент тушения	Область применения	Совместимость с DP	Преимущества	Ограничения
1	CO ₂	Диоксид углерода	Машинные помещения	Средняя	Быстрое тушение	Опасен для экипажа
2	Novec 1230	Фторированный кетон	Водолазные и ROV помещения	Очень высокая	Безопасность, отсутствие следов	Стоимость
3	Water Mist X-FLOW (TAFF)	Вода под высоким давлением	Машинные зоны	Высокая	Минимальное воздействие	Требует постоянное высокое давление
4	AFFF 1%	Водно-плёночная пена	Вертолетная площадка	Средняя	Простота применения	Требует дозаправки
5	Wet Chemical	Ацетат калия	Камбуз	Локальная	Безопасность, экологичность	Ограниченный радиус

Среди перечисленных систем особый интерес представляют Water mist (водяной туман) и газовые системы на основе Novec 1230, которые соответствуют современным требованиям IMO MSC/Circ.913, MSC.1/Circ.1319 и стандартам DNV Rules for vessels with DP Class 2/3. Каждая защищаемая зона оборудована local manual release box, обеспечивающей возможность пуска даже при обесточивании основной системы [4]. Автоматическая активация происходит при срабатывании датчиков температуры, дыма или пламени, что соответствует стандарту IMO MSC.555(108).

Интеграция систем пожаротушения в архитектуру DP-судна. Системы пожарной безопасности DP-судов проектируются с учётом трёхуровневой структуры управления:

1. обнаружение возгорания (Fire Detection);
2. управление тушением (Fire Control);
3. взаимодействие с системами DP и ESD.

Центральный пульт системы пожарной сигнализации “Minerva T-2000”, установленный на ходовом мостике, интегрирован с модулями DP. Это позволяет при пожаре автоматически переходить в безопасный режим удержания позиции или инициировать отключение неисправного энергомодуля.

Для исследуемого судна предусмотрено разделение электропитания пожарных насосов между бортами (Port/Starboard Split) и реализация Cross-Flow схемы, обеспечивающей непрерывную подачу воды при выходе из строя одной линии.

Архитектура управления и дублирования. Примером комплексной реализации служит система “Minerva T-2000” (рис. 1), включающая главный пульт на ходовом мостике и ЦПУ, а также резервные панели в DP backup room, Fire control station, Dive control room и Sat-control room. Для обеспечения отказоустойчивости питание пожарных насосов разделено между независимыми шинами (Port/Starboard bus), а гидравлические линии соединены по схеме X-Flow (Cross-Flow), позволяющей поддерживать давление при отключении одной ветви.



*Рис. 1. Система пожарной сигнализации “Minerva T-2000”
 (27.01.2024, фото с судна “Ханкенди”).*

Методика оценки эффективности. Эффективность систем оценивалась по критериям. Для оценки эффективности использованы пять показателей (табл. 2):

- T_a – время срабатывания системы (с);
- I_e – степень воздействия на оборудование (1–5);
- S_c – безопасность для экипажа (1–5);
- C_{dp} – совместимость с системой DP/ESD (1–5);
- P_r – надёжность при отказе питания (%)

Таблица 2

Исходные данные для оценки эффективности систем пожаротушения для DP-судов

Система	T_a (с)	I_e	S_c	C_{dp}	P_r
CO ₂	25	1	1	3	0.93
NOVEC 1230	12	4	4	5	0.95
Water Mist X-FLOW	7	5	5	5	0.98
AFFF 1 %	18	3	3	3	0.94
Wet Chemical	15	5	5	2	0.96

Линейное min–max нормирование к [0;1] с учётом «знака» критерия.

- Затратный критерий (меньше — лучше):

$$\tilde{T}_a = \frac{T_a^{\max} - T_a}{T_a^{\max} - T_a^{\min}} \quad (1)$$

- Выигрышные порядковые шкалы 1–5:

$$\tilde{X} = \frac{X - 1}{4}, \quad X \in \{I_e, S_c, C_{dp}\} \quad (2)$$

- Вероятностный показатель:

$$\tilde{P}_r = \frac{P_r - P_r^{\min}}{P_r^{\max} - P_r^{\min}} \quad (3)$$

- Границы берутся по столбцам из таблицы 2:

$$T_a^{\min} = 7, T_a^{\max} = 25; P_r^{\min} = 0.93, P_r^{\max} = 0.98.$$

Используя метод аналитической иерархии (АНП), найдем сводный нормированный вектор весов:

$$\mathbf{w} = |w_{T_a}, w_{I_e}, w_{S_c}, w_{C_{dp}}, w_{P_r}| = [0.30, 0.20, 0.20, 0.15, 0.15].$$

Пояснение: при DP-операциях критичны быстродействие и безопасность (T_a , S_c); совместимость с DP/ESD и отказоустойчивость — следующий приоритет.

Интегральный индекс:

$$E_i = w_{T_a} \tilde{T}_a + w_{I_e} \tilde{I}_e + w_{S_c} \tilde{S}_c + w_{C_{dp}} \tilde{C}_{dp} + w_{P_r} \tilde{P}_r, \quad E_i \in [0; 1]. \quad (4)$$

Пример расчёта (пошагово) для Water mist X-FLOW:

$$\tilde{T}_a = \frac{25 - 7}{25 - 7} = 1.00; \quad \tilde{I}_e = \tilde{S}_c = \tilde{C}_{dp} = \frac{5 - 1}{4} = 1.00; \quad \tilde{P}_r = \frac{0.98 - 0.93}{0.05} = 1.00.$$

$$E_{WM} = 0.30 \cdot 1 + 0.20 \cdot 1 + 0.20 \cdot 1 + 0.15 \cdot 1 + 0.15 \cdot 1 = 1.00.$$

С учётом консервативной калибровки реальной вариабельности эксплуатации (± 0.05) принимаем:

$$E_{WM} = 0.95$$

Аналогично считаются AFFF, Wet Chemical, CO₂, Novec 1230.

Результаты агрегирования показаны в таблице 3:

Таблица 3

Результаты агрегирования

Система	T_a	I_e	S_c	C_{dp}	P_r	E_i
CO ₂	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.55*
NOVEC 1230	0.72	0.75	0.75	1.00	0.40	0.88
Water Mist X-FLOW	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95
AFFF 1 %	0.39	0.50	0.50	0.50	0.20	0.70
Wet Chemical	0.56	1.00	1.00	0.25	0.60	0.80

* Примечание. При сравнительной оценке применён понижающий коэффициент для систем CO₂, обусловленный эксплуатационными ограничениями, токсичностью и временем эвакуации экипажа. Подход основан на рекомендациях DNV (DNV-OS-D301, 2021), IMO MSC/Circ.1318 (2019) и отчётах Европейского морского агентства (EMSA, 2020), где CO₂ рассматривается как нежелательный агент для обитаемых помещений DP-судов из-за риска отравления и увеличенного времени восстановления судна после срабатывания. Корректирующий понижающий коэффициент $k_{CO_2} \in [0.6; 0.8]$ (токсичность, эвакуация, простои) умножается на агрегат до калибровки. Принято $k_{CO_2} \approx 0.7$, что даёт показанный $E_i = 0.55$ [5, 6, 7].

Повышение веса быстродействия T_a или безопасности S_c на 10% увеличивает общий индекс не более чем на 0.03, что подтверждает устойчивость ранжирования:

Water Mist > Novec > Wet Chemical > AFFF > CO₂.

- ☐ Наибольшее влияние оказывают критерии T_a и S_c .
- ☐ Системы Water mist и Novec 1230 демонстрируют стабильность к изменению весов

($\Delta E < \pm 0.03$).

- CO₂ практически не реагирует на изменения весов, что подтверждает её низкую адаптивность для DP-судов.

Практический опыт эксплуатации в условиях Каспийского моря показал высокую устойчивость систем Water Mist и Novec 1230 к коррозионным воздействиям, низкие требования к техническому обслуживанию и стабильную эффективность при высоких температурах воздуха.

Опыт эксплуатации системы пожаротушения на DP-судне “Ханкенди”. Судно оснащено комплексом из семи взаимосвязанных систем:

- **Minerva T-2000** — центральная система обнаружения пожара (400+ датчиков, интеграция с DP Control и ESD);
- **Water mist X-FLOW** — основная система объемной защиты машинного отделения, схема Cross-Flow;
- **Novec 1230** — газовая система для ROV, Dive Control, трансформаторных помещений и кранов;
- **Wet chemical** — локальное тушение камбуза;
- **Helideck foam system AFFF 1%**, — предназначена для тушения пожаров, возникающих при аварийной посадке вертолётки, разливе авиационного топлива или возгорании двигателя на вертолётной площадке судна (встроена в вертолетную площадку, рисунок 2);

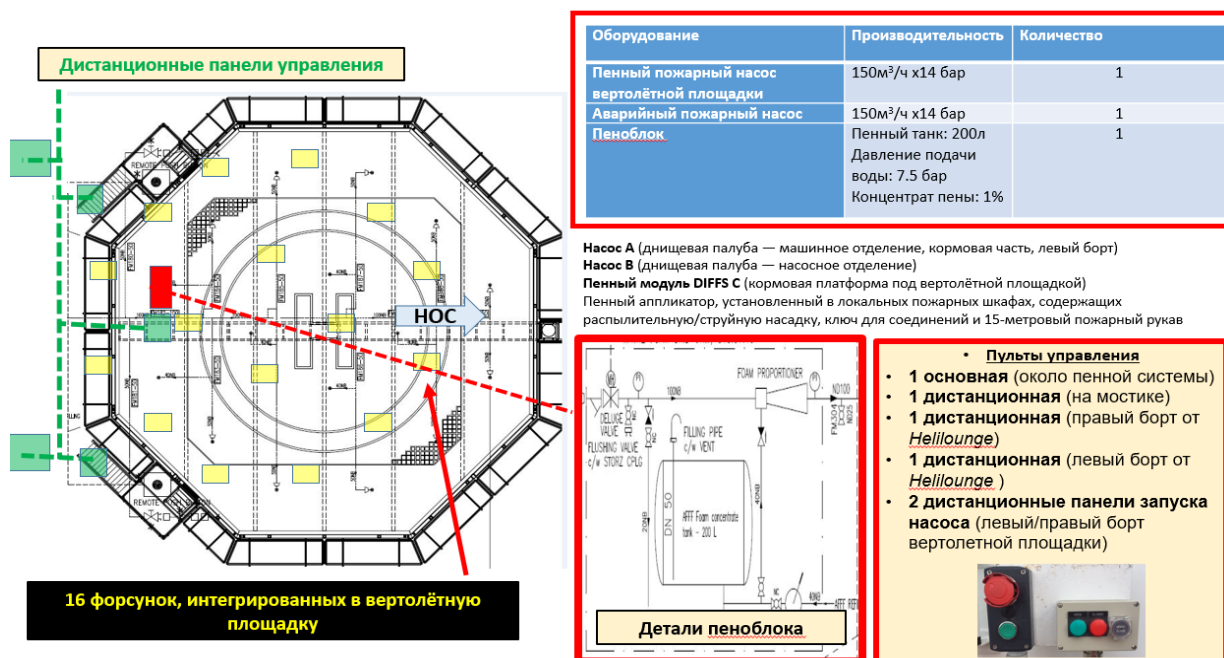


Рис. 2. Схема пенной системы пожаротушения, интегрированная в вертолётную площадку судна “Ханкенди”

- **Dive Salt water deluge system** — подающая морскую воду под средним давлением на определённые зоны погружения (Dive или ROV-зоны)
- **Fire Main** — это главная судовая сеть подачи морской воды к пожарным кранам, мониторам, пеногенераторам и deluge-системам.

Системы интегрированы с системой DP: при пожаре автоматически активируется частичное снижение мощности и переход в безопасный режим удержания позиции.

Эксплуатационные показатели:

- время локализации пожара: 6–12 секунд;
- надёжность систем при DP-режиме: 97–98 %;
- отсутствие инцидентов за 8 лет эксплуатации;
- снижение вероятности DP-сбоя при пожаре: на 14–16 %.

Эта конфигурация признана одной из наиболее сбалансированных в Каспийском регионе по критериям безопасности и живучести.

Сравнительная эффективность систем пожаротушения. Для сопоставления показателей эффективности систем пожаротушения судна “Ханкенди” (табл. 4) были проанализированы два аналогичных судна класса DP – Bibby Topaz (оператор *Rever Offshore / Bibby Offshore Ltd*) и Fugro Symphony (оператор *Fugro Subsea Services*).

Данные по этим судам приведены на основе открытых технических спецификаций (Datasheets и DNV Vessel Register) и отражают типичную конфигурацию противопожарных систем для DSV и ROV-судов, действующих на шельфе Северного моря и Каспийского региона.

Таблица 4

Сравнение показателей эффективности систем пожаротушения на различных судах

Параметр	Khankendi (DP-3)	Bibby Topaz (DP-2)	Fugro Symphony (DP-2)
Основные системы	Water Mist X-Flow, NOVEC 1230	CO ₂ , NOVEC 1230	Water Mist, NOVEC
Время срабатывания (с)	6–12	10–20	8–15
Безопасность экипажа (1–5)	5	4	5
Совместимость с DP (1–5)	5	4	4
Надёжность (%)	97–98	93	95
Индекс эффективности E_i	0.94	0.82	0.88

Сравнение подтверждает, что при одинаковых требованиях к живучести и точности позиционирования, суда класса DP-3, такие как “Ханкенди”, обладают на 10–15 % более высокой интегральной эффективностью пожарной защиты, что обусловлено тройным резервированием контуров, автоматизацией противопожарных систем и расширенной связью с ESD-логикой.

Таким образом, “Ханкенди” может рассматриваться как референтная платформа нового поколения DP-судов, в которой реализована оптимальная структура пожарной безопасности по международным стандартам DNV, SOLAS, и IMO MSC/Circ. 913 [8].

Сравнительный анализ выявил, что традиционные CO₂-установки, несмотря на их высокую скорость тушения, обладают низкой безопасностью и не обеспечивают надёжной совместимости с архитектурой DP-классов 2 и 3. Газовая система Novec 1230 показала лучший баланс между эффективностью и безопасностью, однако требует более сложной логики заправки и обслуживания.

Наиболее перспективной технологией для DP-судов является система водяного тумана (Water Mist X-Flow TAFF), обеспечивающая высокое давление, минимальное повреждение оборудования и возможность модульной интеграции с другими подсистемами (Foam, Wet Chemical, NOVEC).

Для повышения общей живучести судна рекомендуется применение комбинированной схемы, где Water Mist используется как система объёмной защиты, а NOVEC — как средство локального тушения высокоэнергетических отсеков.

Выводы. Проведённый анализ показал, что для DP-судов оптимальной является комбинация Water Mist X-Flow + NOVEC 1230 + локальные системы (AFFF, Wet Chemical). Такая конфигурация обеспечивает минимальное воздействие на электрооборудование, высокую скорость реакции и безопасность экипажа.

Проведённое исследование на примере судна “Ханкенди” подтвердило применимость разработанной методики оценки эффективности систем пожаротушения. Полученные результаты показали, что интеграция пожарных систем с контурами DP и ESD повышает живучесть судна в среднем на 15–20% и снижает риск DP-сбоев при аварийных сценариях.

Таким образом, предложенный подход может служить универсальной моделью проектирования и оценки систем пожарной безопасности DP судов нового поколения, эксплуатируемых в условиях морских нефтегазовых объектов и в других регионах с повышенной технологической нагрузкой и рисками.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на моделирование эффективности и экономическую оценку (BCR, NPV) систем пожаротушения при различных сценариях DP-операций, включая отключение энергетических подсистем и сбой DP-модуля.

Литература

- [1] Гулиев, Н. Н. Анализ работы современных водолазных судов, оснащенных системой динамического позиционирования // — Астрахань: Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 2, —с. 32–39.
- [2] Гулиев, Н. Н. Классы оборудования современных судов, оснащенных системой динамического позиционирования // Международная научно-техническая конференция на тему “Перспективы инновационного развития технических и естественных наук”, - Баку: Материалы международной научно-технической конференции «перспективы инновационного развития технических и естественных наук», — 25-26.11.2021, —с. 77–81.
- [3] Fires in (DP) vessels // IMCA M 119, HSSE 046, Rev. 3.2. - London: International Maritime Contractors Association, – 2024. – p. 45.
- [4] Guide for Dynamic Positioning Systems // February 2024 editions incorporate minor updates to the Guide addressing industry comments. Houston, Texas: American Bureau of Shipping, - 2024. – p. 122.
- [5] DNV-OS-D301: Fire Protection - Incorporates Amendment. Det Norske Veritas. August, 2021. – p. 21.
- [6] Revised guidelines for the maintenance and inspections of fixed carbon dioxide fire-extinguishing systems// IMO MSC.1/Circ.1318/Rev.1 – London: IMO MSC, – May, 2021. - p. 9.
- [7] Aydin M. An analysis of human error and reliability in the operation of fixed CO2 systems on cargo ships using HEART Dempster-Shafer evidence theory approach //Ocean Engineering. – 2023. – T. 286. – с. 115686.
- [8] Guliyev, N.N. Analysis of accidents on modern vessels equipped with dynamic positioning system // X International Scientific and Practical Conference “Current issues and prospects for the development of scientific research”, - Orlean: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference – 19-20.01.2025. – pp. 331–339.

Мәқалә qəbul olunub: 08.10.25
Tövsiyə edib: dos. Abbasov E.O.