

УДК 629.565.3+656.089.2
EDN: OTTOOY

Д.Ф. Салихов, А.В. Краморенко

Научно-исследовательский институт спасания и подводных технологий ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»,
Санкт-Петербург, Россия

СПОСОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА РАВНОВЕСНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ПРИ ПОДЪЕМЕ ЗАТОНУВШИХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ СУДОПОДЪЕМНЫХ ПОНТОНОВ

Объект и цель научной работы. Объектом является совершенствование способов выполнения инженерных расчетов при судоподъеме. Цель – разработка способа автоматизированного расчета равновесных положений системы «затонувший объект – понтоны» с вычислением осадки поднимаемого затонувшего объекта и его дифферента на различных этапах всплытия, позволяющего ускорить процесс вычислений и повысить их точность.

Материалы и методы. Научные положения теории судоподъема, методики расчета равновесных положений при подъеме затонувших объектов.

Основные результаты. Разработан способ автоматизированного расчета равновесных положений системы «затонувший объект – понтоны». Он заключается в применении при выполнении расчетов математических зависимостей, основанных на замене характеристик реальных цилиндрических понтонов круглой формы расчетными характеристиками соответствующих им эквивалентных понтонов прямоугольной формы той же грузоподъемности, а также на расположении эквивалентных понтонов на схеме подъема затонувшего объекта в тех же координатах по длине, а по высоте со смещением вверх на величину нулевой осадки реальных понтонов. Это позволяет применять математические зависимости вместо применявшихся ранее графических зависимостей, дающих исходные значения для расчетов вручную со значительными погрешностями.

Заключение. Замена стальных судоподъемных понтонов (ССП) реальной формы на ССП с эквивалентными размерами при расчетах позволяет обеспечить ускоренное автоматизированное выполнение расчетов равновесных положений с определением осадки и дифферента при подъеме затонувших объектов, поднимаемых судоподъемными понтонами. Также это дает возможность увеличить их точность за счет применения математических зависимостей вместо графических зависимостей, дающих исходные значения для расчетов вручную со значительными погрешностями.

Ключевые слова: расчет равновесных положений, затонувший объект, судоподъемный понтон, эквивалентный понтон, автоматизированный расчет.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.565.3+656.089.2
EDN: OTTOOY

D.F. Salikhov, A.V. Kramorenko

Research Institute of Rescue and Underwater Technologies, N.G. Kuznetsov Naval Academy, St. Petersburg, Russia

AUTOMATED METHOD OF EQUILIBRIUM CALCULATION FOR PONTOON-BASED SHIP SALVAGING

Object and purpose of research. This paper discusses possible ways to improve engineering calculation methods in ship salvaging. The study was intended to develop an automated method of equilibrium calculation for “sunken object – pontoons” system with calculation of draft and trim of salvaged object at different stages of its surfacing. This method would make calculations faster and more accurate.

Для цитирования: Салихов Д.Ф., Краморенко А.В. Способ автоматизированного расчета равновесных положений при подъеме затонувших объектов с помощью судоподъемных понтонов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2025; 4(414): 69–78.

For citations: Salikhov D.F., Kramorenko A.V. Automated method of equilibrium calculation for pontoon-based ship salvaging. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2025; 4(414): 69–78 (in Russian).

Materials and methods. The study relies on salvaging theory and equilibrium calculation procedures used in salvaging of sunken objects.

Main results. The authors developed an automated method for equilibrium calculation of “sunken object – pontoons” system. The procedure of this calculation substitutes real pontoons with round cylindrical shape by equivalent rectangular pontoons of the same capacity and same location by sunken object length. The vertical location of these pontoons is shifted upwards by the zero draft of real ones. Therefore, the method can take calculation inputs from mathematical expressions, not from the plots used previously for manual calculations with significant inaccuracies.

Conclusion. Substitution of real pontoons by the equivalent ones allows faster automated calculation of equilibrium, with determination of draft and trim of sunken objects in the process of pontoon-based salvaging. The method also offers higher accuracy of calculations because the inputs are taken from mathematical expression, whereas previously these inputs were taken from plots and calculations themselves were performed manually with significant errors.

Keywords: equilibrium calculation, sunken object, salvage pontoon, equivalent pontoon, automated calculation.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Применение стальных судоподъемных понтонов (ССП) при подъеме затонувших объектов в России остается актуальным. Они обеспечивают подъем затонувших объектов способом восстановления собственной плавучести и являются альтернативой применению плавучих кранов и крановых судов, позволяя выполнить работы с меньшими затратами и без разделки затонувшего объекта на части.

Существует большое количество примеров успешного подъема затонувших объектов с помощью ССП, начиная с подъема силами ЭПРОНа подводной лодки «Пеликан» в 1924 г. [1] и заканчивая современными судоподъемными работами, такими как подъем большого противолодочного корабля «Очаков» [2], водолазных судов ВМ-413 [3] и ВМ-416 [4] в 2014 г., баржи «Новгород-Северский» в 2018 г. [5] и списанной подводной лодки Б-380 [6] в 2019 г. Применение ССП рассматривалось при разработке проектов подъема частей танкеров «Волгонефть-212» и «Волгонефть-239», затонувших в Керченском проливе [7].

Несмотря на активное применение ССП в справочной, технической и учебной литературе не в полной мере отражены отдельные теоретические вопросы выполнения расчетов положения объекта, поднимаемого на понтон. В частности, в расчетах начала всплытия и полного всплытия затонувшего объекта на ССП используются только абсциссы точек приложения подъемных сил, создаваемых ССП, а их аппликаты не учитываются, что не приводит к существенным погрешностям в расчете при малых углах дифферента в пределах нескольких градусов.

Вместе с тем существует ряд задач, в которых неучет аппликат точек приложения подъемных сил, создаваемых ССП, приводит к значительным по-

грешностям и ошибкам. Прежде всего речь идет о расчетах равновесного положения поднимаемого объекта, всплывшего одной оконечностью, когда искомой расчетной величиной является величина угла дифферента. Неточность расчета приводит к снижению безопасности выполнения работ, когда фактический дифферент превысит критическую величину, при которой начнется смещение ССП в сторону поднятой оконечности. На практике недопустимым является дифферент, превышающий 20° . При этом искусственное занижение допустимого при подъеме дифферента ведет к необходимости разбиения процесса всплытия на множество ступеней, что существенно усложняет общую технологию подъема, а также увеличивает сложность и продолжительность работ.

Одной из причин, по которой расчеты ранее выполнялись в упрощенной форме, являлось несовершенство технических средств их выполнения. Расчеты вручную, на логарифмической линейке, с помощью арифмометра или на калькуляторе были длительными и уязвимыми от ошибок при выполнении арифметических действий и нарушении их последовательности. Широкие перспективы открылись при появлении ЭВМ и программ, позволяющих автоматизировать расчеты при наличии соответствующих алгоритмов. В рамках НИР «Гиперион-2022» [8] разработана «Методика расчета сил и моментов сил при подъеме затонувшего объекта с применением стальных судоподъемных понтонов», в которой рассмотрены равновесные положения, величины и моменты действующих сил на всех этапах всплытия поднимаемого объекта на ССП, включая начало всплытия одной оконечностью, завершение всплытия одной оконечностью, начало всплытия второй оконечностью и полное всплытие на поверхность.

Известны способы расчета равновесных положений при подъеме затонувших объектов с помо-

щью судоподъемных понтонов последовательными приближениями при равенстве значений действующих сил и моментов сил тяжести и плавучести в статической постановке задачи с использованием графических зависимостей грузоподъемности судоподъемных понтонов от осадки, крена и дифферента, представленных в приложениях 7–10 «Справочника по расчетам при судоподъеме» [9, с. 393–409], или масштабов Бонжана понтонов, представленных в приложениях 32–43 «Справочника специалиста аварийно-спасательной службы ВМФ» [10, с. 589–593]. Недостатками известных способов расчета являются длительный процесс вычислений, невозможность автоматизированного расчета из-за необходимости пользоваться графическими материалами и невысокая точность расчета из-за получения исходных значений для расчетов вручную со значительными погрешностями.

Задачей является устранение вышеизложенных недостатков посредством разработки способа автоматизированного расчета, позволяющего ускорить процесс вычислений и повысить их точность. В рамках статьи рассматривается всплытие поднимаемого объекта одной оконечностью при трех возможных типах остротки ССП – лагом, над палубой на подкильных стропях и над палубой с точечным креплением стропов (за штоки).

Понятие об эквивалентном понтоне

Idea of equivalent pontoon

Подъемная сила полностью погруженного ССП определяется исходя из его осадки, крена и дифферента по формуле:

$$Q_{\text{ССП}}(\psi, \theta) = \gamma_{\text{в}} \cdot V_{\text{ССП}}(\psi) - P_{\text{ССП}} - \Delta Q_{\text{ССП}}(\psi) - \Delta Q_{\text{ССП}}(\theta), \quad (1)$$

где $\gamma_{\text{в}}$ – удельный вес воды, тс/м³; $V_{\text{ССП}}(\psi)$ – водоизмещающий объем ССП при заданном диффе-

ренте, м³; $P_{\text{ССП}}$ – вес ССП в воздухе (с погрешностью в безопасную сторону; архимедова сила, действующая на ССП, не учитывается), тс; $\Delta Q_{\text{ССП}}(\psi)$ – потеря подъемной силы ССП вследствие дифферента, тс; $\Delta Q_{\text{ССП}}(\theta)$ – потеря подъемной силы ССП вследствие крена, тс; ψ – дифферент, град.; θ – крен, град.

Определение значения водоизмещающего объема при практическом применении формулы (1) до недавнего времени предполагало графическое построение пространственного положения объекта, поднимаемого с помощью ССП, с целью определения осадки ССП носом и кормой при заданном (текущем) значении дифферента, чтобы воспользоваться масштабом Бонжана [10, с. 589–593]. В связи с тем, что поиск равновесного положения производится методом последовательных приближений, расчет выполняется многократно, что значительно увеличивает его трудоемкость.

Необходимость графических построений и снятия значений с масштаба Бонжана вручную препятствует автоматизации расчетов и снижает их точность, особенно при малых изменениях переменной величины, в качестве которой выступает значение текущего дифферента. Автоматизации расчетов и повышению их точности способствует замена при выполнении расчетов характеристик реальных цилиндрических понтонов круглой формы определенного проекта – диаметра $D_{\text{ССП}}$ и длины $L_{\text{ССП}}$ – характеристиками соответствующих эквивалентных понтонов прямоугольной формы (рис. 1) той же грузоподъемности с расчетными размерами – длиной $L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}}$, шириной $B_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}}$ и высотой $D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}}$, определяемыми с учетом удельного веса воды $\gamma_{\text{в}}$, полного объема $V_{\text{ССП}}$ реального понтона, его веса в воздухе $P_{\text{ССП}}$ и потери подъемной силы вследствие крена $\Delta Q_{\text{ССП}}(\theta)$ по формулам:

$$L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} = 4 \cdot V_{\text{ССП}} / (\pi \cdot D_{\text{ССП}}^2), \\ D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} = V_{\text{ССП}} / (D_{\text{ССП}} \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}});$$

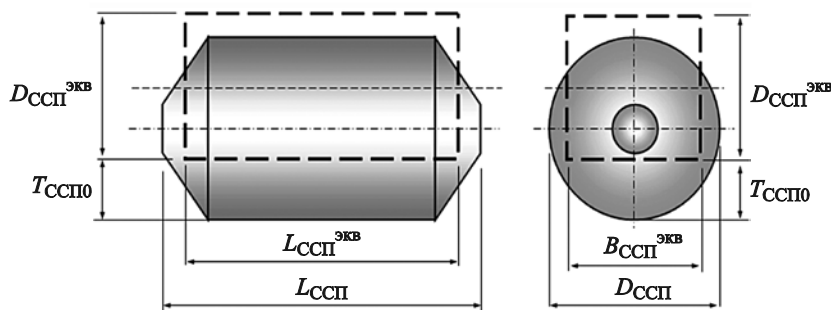


Рис. 1. Линейные размеры эквивалентного стального судоподъемного понтона

Fig. 1. Linear dimensions of pontoon

$$V_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} = (\gamma_{\text{в}} \cdot V_{\text{ССП}} - P_{\text{ССП}} - \Delta Q_{\text{ССП}}(\theta)) / (D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}}) \quad (2)$$

где $V_{\text{ССП}}$ – полный объем ССП (объемы отсеков и воздушного ящика), м^3 ; $D_{\text{ССП}}$ – диаметр ССП, м.

Потери подъемной силы при наличии крена и дифферента определяются из таблиц, представленных в «Справочнике по расчетам при судоподъеме» [9, с. 393–409].

Расчет подъемных сил и координат подъемных сил стального судоподъемного понтона при лаговой остропке

Calculation of lift forces and their coordinates for steel salvaging pontoon near hull sides

При лаговой остропке (рис. 2) координаты создаваемой ССП подъемной силы соответствуют центру водоизмещающего объема.

При полностью погруженном ССП выполняется условие

$$H > A. \quad (3)$$

$$A = (x_{\text{ССП}} - x_N + 1/2 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}}) \cdot \sin \psi + (z_{\text{ССП}} + 1/2 \cdot D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}}) \cdot \cos \psi - h_{\text{гр}}, \quad (4)$$

где x_N – абсцисса точки поворота при подъеме одной оконечностью, м; $h_{\text{гр}}$ – заглубление точки поворота в грунт, м.

Подъемная сила:

$$Q_{\text{ССП}}(\psi, \theta) = \gamma_{\text{в}} \cdot D_{\text{ССП}} \cdot D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - P_{\text{ССП}} - \Delta Q_{\text{ССП}}(\psi) - \Delta Q_{\text{ССП}}(\theta). \quad (5)$$

Координаты:

$$x_Q = x_{\text{ССП}}; \quad z_Q = z_{\text{ССП}}. \quad (6)$$

При неполном погружении ССП с треугольной проекцией надводного объема выполняются условия:

$$H < A; \quad D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} > B; \quad L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \geq B \cdot 1/\text{tg} \psi. \quad (7)$$

$$B = (A - H) \cdot 1/\cos \psi. \quad (8)$$

Подъемная сила:

$$Q_{\text{ССП}} = Q_{\text{ССП}}(\psi, \theta) - \gamma_{\text{в}} \cdot 1/2 \cdot B^2 \cdot 1/\text{tg} \psi \cdot D_{\text{ССП}}. \quad (9)$$

Координаты:

$$x_Q = (Q_{\text{ССП}}(\psi, \theta) \cdot x_{\text{ССП}} - \gamma_{\text{в}} \cdot 1/2 \cdot B^2 \cdot 1/\text{tg} \psi \cdot D_{\text{ССП}} \times (x_{\text{ССП}} + 1/2 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - 1/3 \cdot B \cdot 1/\text{tg} \psi)) / Q_{\text{ССП}}; \quad (10)$$

$$z_Q = (Q_{\text{ССП}}(\psi, \theta) \cdot z_{\text{ССП}} - \gamma_{\text{в}} \cdot 1/2 \cdot B^2 \cdot 1/\text{tg} \psi \cdot D_{\text{ССП}} \times (z_{\text{ССП}} + 1/2 \cdot D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - 1/3 \cdot B)) / Q_{\text{ССП}}. \quad (11)$$

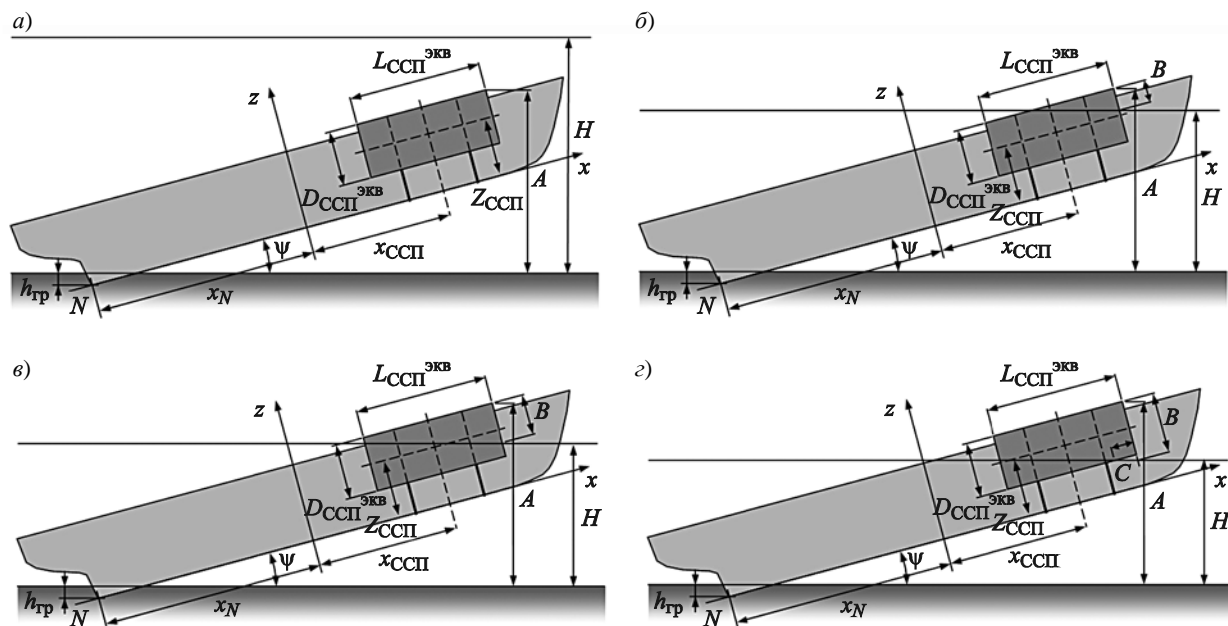


Рис. 2. Варианты расположения стального судоподъемного понтона относительно поверхности воды при лаговой (бортовой) остропке: а) полное погружение; б) неполное погружение с треугольной проекцией надводного объема; в) неполное погружение с четырехугольной проекцией надводного объема; г) неполное погружение с пятиугольной проекцией надводного объема

Fig. 2. Variants of pontoon arrangement with respect to water surface in case of side location: а) total immersion; б) partial immersion with triangular projection of above-water volume; в) partial immersion with quadrangular projection of above-water volume; г) partial immersion with pentangular projection of above-water volume

При неполном погружении ССП с четырехугольной проекцией надводного объема выполняются условия

$$D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} > B; L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} < B \cdot 1/\text{tg}\psi. \quad (12)$$

Подъемная сила:

$$Q_{\text{ССП}} = Q_{\text{ССП}}(\psi, \theta) - \gamma_{\text{в}} \cdot ((B - L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot \text{tg}\psi) \times L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot D_{\text{ССП}} - 1/2 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}^2} \cdot \text{tg}\psi \cdot D_{\text{ССП}}). \quad (13)$$

Расчет прекращается при условии $Q_{\text{ССП}} < 0$.

Координаты:

$$x_Q = ((Q_{\text{ССП}}(\psi, \theta) - \gamma_{\text{в}} \cdot ((B - L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot \text{tg}\psi) \times L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot D_{\text{ССП}}) \cdot x_{\text{ССП}} - 1/2 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}^2} \cdot \text{tg}\psi \cdot D_{\text{ССП}} \times (x_{\text{ССП}} + 1/6 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}})) / Q_{\text{ССП}}; \quad (14)$$

$$z_Q = ((Q_{\text{ССП}}(\psi, \theta) - \gamma_{\text{в}} \cdot ((B - L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot \text{tg}\psi) \times L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot D_{\text{ССП}}) \cdot (z_{\text{ССП}} + 1/2 \cdot D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - 1/2 \cdot (B - L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot \text{tg}\psi)) - 1/2 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}^2} \cdot \text{tg}\psi \cdot D_{\text{ССП}} \times (z_{\text{ССП}} + B + 2/3 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot \text{tg}\psi)) / Q_{\text{ССП}}. \quad (15)$$

При неполном погружении ССП с пятиугольной проекцией надводного объема выполняется условие:

$$B > D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}}. \quad (16)$$

Подъемная сила:

$$Q_{\text{ССП}} = \gamma_{\text{в}} \cdot 1/2 \cdot (L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - C)^2 \cdot \text{tg}\psi \cdot D_{\text{ССП}} - P_{\text{ССП}} - \Delta Q_{\text{ССП}}(\psi) - \Delta Q_{\text{ССП}}(\theta), \quad (17)$$

где

$$C = (B - D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}}) \cdot 1/\text{tg}\psi. \quad (18)$$

Расчет прекращается при условии $Q_{\text{ССП}} < 0$.

Координаты:

$$x_Q = x_{\text{ССП}} - 1/2 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} + 1/3 \cdot (L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - C); \quad (19)$$

$$z_Q = z_{\text{ССП}} - 1/2 \cdot D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} + 1/3 \cdot (L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - C) \cdot \text{tg}\psi. \quad (20)$$

Расчет подъемных сил и координат подъемных сил стального судоподъемного понтона при надпалубной остропке

Calculation of lift forces and their coordinates for steel salvaging pontoon above deck

При надпалубной остропке на подкильных стропках (рис. 3) ССП не рассматриваются как часть продуваемого объема поднимаемого объекта, а координаты точки приложения создаваемых ими подъемных сил зависят от расположения судоподъемных стропов и нагрузки в них. ССП во время

всплытия одной оконечностью сохраняют исходный дифферент относительно основной плоскости поднимаемого объекта, но имеют возможность смещаться в сторону опережающей при всплытии оконечности.

Отклонение зависит от величины проекции длины отклоняющейся части судоподъемного стропка на диаметральную плоскость $l_{\text{пр}}$, которая измеряется от входа судоподъемного стропка в клюз до фиксированной точки на корпусе поднимаемого объекта, через которую проходит ось поворота стропка. Ее аппликата находится в пределах от 0 (точка расположена в основной плоскости) до некоторого значения a , не превышающего высоты корпуса, в котором строп механическим образом зафиксирован от смещения в сторону опережающей при всплытии оконечности.

При полном погружении ССП выполняется условие:

$$H > A. \quad (21)$$

$$A = (x_{\text{ССП}} - x_N + 1/2 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}}) \cdot \sin\psi + l_{\text{пр}} + (a + D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}}) \cdot \cos\psi - h_{\text{гр}}, \quad (22)$$

где $l_{\text{пр}}$ – проекция длины отклоняющейся части судоподъемного стропка на диаметральную плоскость, м; $\Delta l_{\text{пр}}$ – поправка проекции длины, учитывающая допущение об эквивалентном ССП (рис. 1), м; a – аппликата точки фиксации судоподъемного стропка на корпусе поднимаемого объекта, м.

Подъемная сила:

$$Q_{\text{ССП}}(\psi, \theta) = \gamma_{\text{в}} \cdot D_{\text{ССП}} \cdot D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - P_{\text{ССП}} - \Delta Q_{\text{ССП}}(\psi) - \Delta Q_{\text{ССП}}(\theta). \quad (23)$$

Координаты:

$$x_Q = x_{\text{ССП}}; z_Q = a. \quad (24)$$

При неполном погружении ССП с треугольной проекцией надводного объема выполняются условия

$$H < A; D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} > B; L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \geq B \cdot 1/\text{tg}\psi. \quad (25)$$

$$B = (A - H) \cdot 1/\cos\psi. \quad (26)$$

Подъемная сила:

$$Q_{\text{ССП}} = Q_{\text{ССП}}(\psi, \theta) - \gamma_{\text{в}} \cdot 1/2 \cdot B^2 \cdot 1/\text{tg}\psi \cdot D_{\text{ССП}}. \quad (27)$$

Координаты:

$$x_Q = (Q_{\text{ССП}}(\psi, \theta) \cdot x_{\text{ССП}} - \gamma_{\text{в}} \cdot 1/2 \cdot B^2 \cdot 1/\text{tg}\psi \cdot D_{\text{ССП}} \times (x_{\text{ССП}} + (l_{\text{пр}} + \Delta l_{\text{пр}}) \cdot \sin\psi + 1/2 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - 1/3 \cdot B \cdot 1/\text{tg}\psi)) / Q_{\text{ССП}}; \quad (28)$$

$$z_Q = a. \quad (29)$$

При неполном погружении ССП с четырехугольной проекцией надводного объема выполняются условия:

$$D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} > B; L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} < B \cdot 1/\text{tg}\psi. \quad (30)$$

Подъемная сила:

$$Q_{\text{ССП}} = Q_{\text{ССП}}(\psi, \theta) - \gamma_{\text{в}} \cdot ((B - L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot \text{tg}\psi) \cdot \times \\ \times L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot D_{\text{ССП}} - 1/2 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}^2} \cdot \text{tg}\psi \cdot D_{\text{ССП}}). \quad (31)$$

Расчет прекращается при условии $Q_{\text{ССП}} < 0$.

Координаты:

$$x_Q = ((Q_{\text{ССП}}(\psi, \theta) - \gamma_{\text{в}} \cdot ((B - L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot \text{tg}\psi) \cdot \times \\ \times L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot D_{\text{ССП}} - 1/2 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}^2} \cdot \text{tg}\psi \cdot D_{\text{ССП}} \times \\ \times (x_{\text{ССП}} + 1/6 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}}))) / Q_{\text{ССП}}; \quad (32)$$

$$z_Q = a. \quad (33)$$

При неполном погружении ССП с пятиугольной проекцией надводного объема выполняется условие:

$$B > D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}}. \quad (34)$$

Подъемная сила:

$$Q_{\text{ССП}} = \gamma_{\text{в}} \cdot 1/2 \cdot (L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - C)^2 \cdot \text{tg}\psi \cdot D_{\text{ССП}} - \\ - P_{\text{ССП}} - \Delta Q_{\text{ССП}}(\psi) - \Delta Q_{\text{ССП}}(\theta), \quad (35)$$

где C вычисляется по формуле (18).

Расчет прекращается при условии $Q_{\text{ССП}} < 0$.

Координаты:

$$x_Q = x_{\text{ССП}} - 1/2 \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} + 1/3 \cdot (L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - C); \quad (36)$$

$$z_Q = a. \quad (37)$$

Расчет подъемных сил и координат подъемных сил стального судоподъемного понтона при надпалубной остропке с точечным креплением

Calculation of lift forces and their coordinates for steel salvaging pontoon above deck

При остропке над палубой с точечным креплением стропов (рис. 4) ССП независимо от изменяющегося

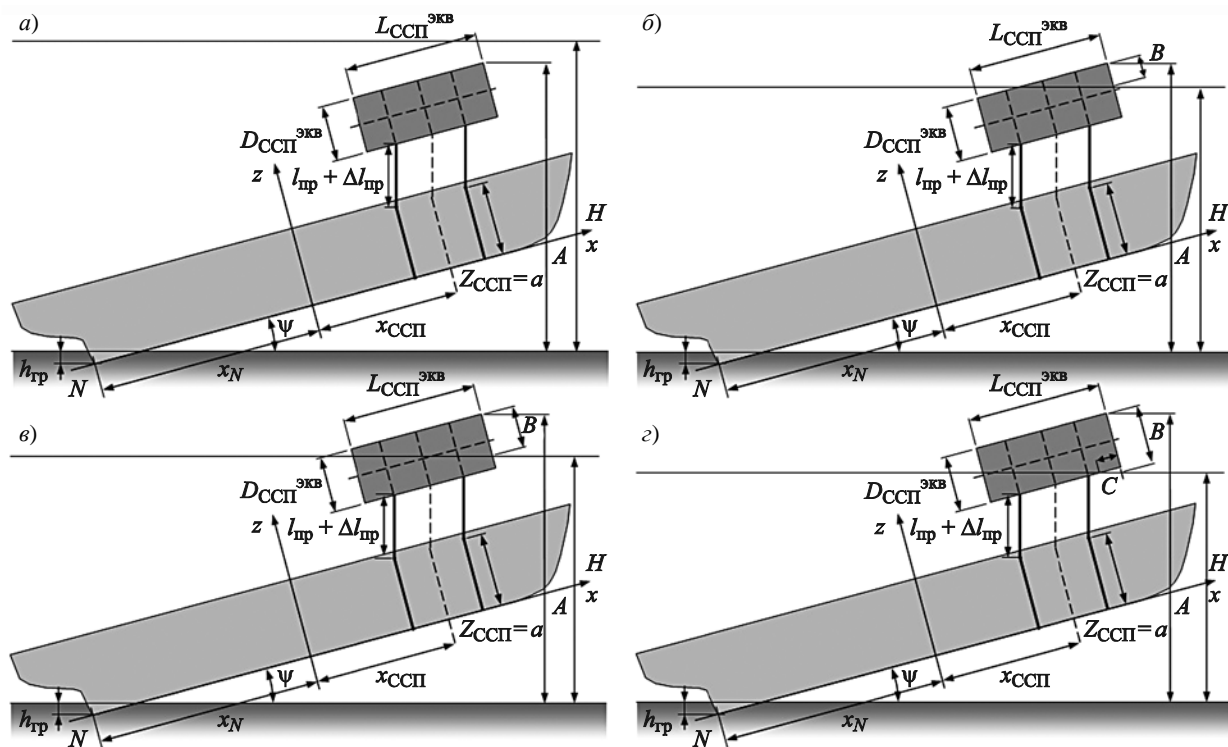


Рис. 3. Варианты расположения стального судоподъемного понтона относительно поверхности воды при надпалубной остропке на подкильных стропках: а) полное погружение; б) неполное погружение с треугольной проекцией надводного объема; в) неполное погружение с четырехугольной проекцией надводного объема; г) неполное погружение с пятиугольной проекцией надводного объема

Fig. 3. Variants of pontoon arrangement with respect to water surface in case of location above deck with underkeel strap lines: а) total immersion; б) partial immersion with triangular projection of above-water volume; в) partial immersion with quadrangular projection of above-water volume; г) partial immersion with pentagonal projection of above-water volume

при всплытии одной оконечностью дифферента сохраняет горизонтальное положение или исходное наклонение, обусловленное разной длиной стропов, но при изменении дифферента смещается в сторону опережающей при всплытии оконечности.

При полном погружении ССП (исходный дифферент отсутствует) выполняется условие:

$$H > A. \quad (39)$$

$$A = (x_{\text{ССП}} - x_N) \cdot \sin\psi + a \cdot \cos\psi + l_{\text{пр}} + \Delta l_{\text{пр}} + D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - h_{\text{гр}}, \quad (40)$$

где $l_{\text{пр}}$ – средняя длина проекции судоподъемных стропов на плоскость миделевого сечения ССП, м; a – аппликата точки крепления судоподъемных стропов на корпусе поднимаемого объекта, м.

Подъемная сила:

$$Q_{\text{ССП}} = \gamma_v \cdot D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot D_{\text{ССП}} \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - P_{\text{ССП}} - \Delta Q_{\text{ССП}}(\theta). \quad (41)$$

Координаты:

$$x_Q = x_{\text{ССП}}; \quad z_Q = a. \quad (42)$$

При неполном погружении ССП выполняются условия

$$H < A; \quad T_{\text{ССП}} > T_{\text{ССП}0}, \quad (43)$$

где $T_{\text{ССП}0}$ – осадка, при которой отсутствует подъемная сила ССП, м.

$$T_{\text{ССП}} = D_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - (A - H). \quad (44)$$

Подъемная сила:

$$Q_{\text{ССП}} = \gamma_v \cdot T_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} \cdot D_{\text{ССП}} \cdot L_{\text{ССП}}^{\text{ЭКВ}} - P_{\text{ССП}} - \Delta Q_{\text{ССП}}(\theta). \quad (45)$$

Координаты:

$$x_Q = x_{\text{ССП}}; \quad z_Q = a. \quad (46)$$

Расчеты по формулам (1)–(46) целесообразно выполнять в оболочке Excel.

Оценка погрешности расчетов

Assessment of calculation accuracy

Работоспособность формул подтверждена решением контрольных примеров. С научной точки зрения, целесообразно оценить погрешность, обусловленную заменой ССП реальной формы на ССП с эквивалентными размерами. Для этого был решен контрольный пример подъема одной оконечностью затонувшего корабля подъемным весом 1300 тс с помощью двух пар 200-тонных ССП проекта 528, острогленных лагом, и одной пары таких же ССП,

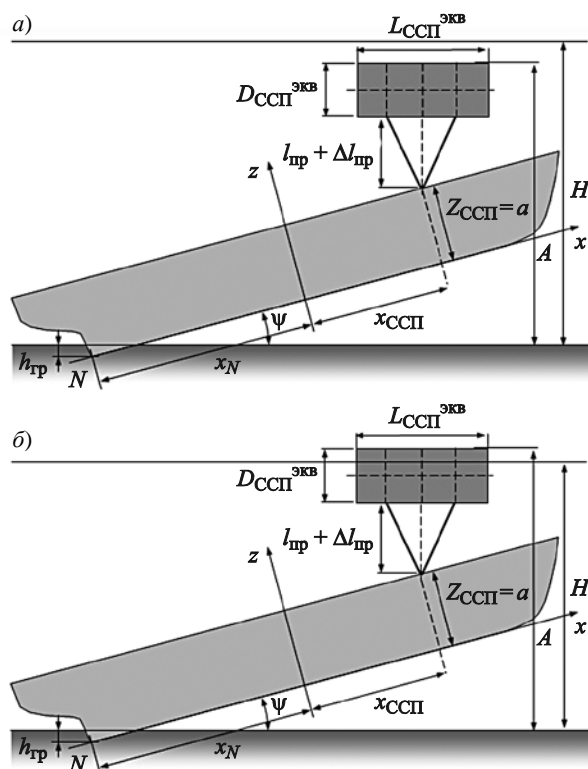


Рис. 4. Варианты расположения стального судоподъемного понтона относительно поверхности воды при надпалубной остропке с точечным креплением стропов (за штоки): а) полное погружение; б) неполное погружение

Fig. 4. Variants of pontoon arrangement with respect to water surface in case of location above deck with point attachment of strap lines (via stocks): а) total immersion; б) partial immersion

острогленных над палубой на подкильных стропках (рис. 5).

Условием равновесия является равенство моментов силы тяжести и подъемных сил, создаваемых ССП:

$$M_P(\psi) = \sum M_{Q_{\text{ссп}i}}(\psi), \quad (47)$$

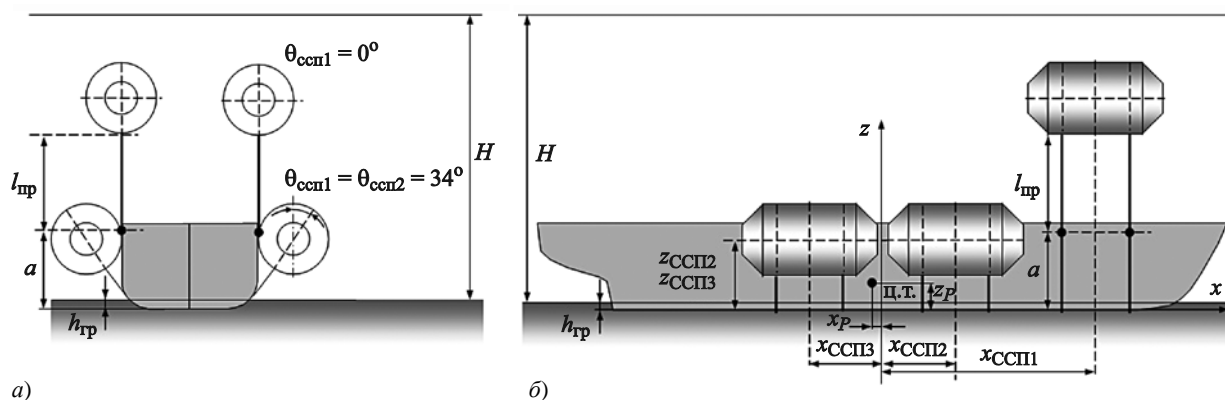
где

$$M_P(\psi) = P_{\text{под}} \cdot ((x_P - x_N) \cdot \cos\psi - z_P \cdot \sin\psi); \quad (48)$$

$$M_{Q_{\text{ссп}i}}(\psi) = Q_{\text{ссп}i} \cdot ((x_{Qi} - x_N) \cdot \cos\psi - z_{Qi} \cdot \sin\psi). \quad (49)$$

При определении величины подъемной силы 200-тонных ССП проекта 528 учитывается крен, который при надпалубной остропке равен нулю, а при лаговой остропке составляет 34°.

Результаты расчета представлены в виде зависимости дифферента системы «затонувший объект –



а) б)
Рис. 5. Схема размещения стального судоподъемного понтона при подъеме носовой оконечности:
 а) вид спереди; б) вид сбоку

Fig. 5. Arrangement of steel pontoon in the process of forward part salvaging: а) front view; б) side view

понтон» от глубины подъема при одинаковой длине стропов. Для сравнения вычислена аналогичная зависимость без допущения о применении ССП с эквивалентными размерами и, как следствие, без выполнения автоматизированного расчета. Расчет произведен вручную с использованием масштаба Бонжана ССП проекта 528 [10, с. 589–593]. При этом для расчета ватерлинии ССП применялась измененная формула (22), представленная ниже для правого и левого торцов ССП:

$$A_{np} = (x_{ссп} - x_N + 1/2 \cdot L_{ссп}) \cdot \sin\psi + l_{np} + (a + D_{ссп}) \cdot \cos\psi - h_{np}; \quad (50)$$

$$A_l = (x_{ссп} - x_N - 1/2 \cdot L_{ссп}) \cdot \sin\psi + l_{np} + (a + D_{ссп}) \cdot \cos\psi - h_{np}. \quad (51)$$

Тогда с учетом формулы 26 осадки ССП по правому и левому торцам

$$T_{np} = D_{ссп} - (A_{np} - H) \cdot 1/\cos\psi; \quad (52)$$

$$T_l = D_{ссп} - (A_l - H) \cdot 1/\cos\psi. \quad (53)$$

Пример снятия значений подъемной силы ССП с масштаба Бонжана представлен на рис. 6. Подъемная сила определяется как сумма снятых с масштаба Бонжана значений для каждого отсека ССП. При определении координат точки приложения подъемной силы ССП принято допущение, что абсциссы подъемных сил, создаваемых отсеками, находятся посередине отсеков.

Графическое изображение зависимостей дифферента системы «затонувший объект – понтоны» от глубины подъема при одинаковой длине стропов при выполнении автоматического и ручного расчета представлены на рис. 7.

Расчеты показали, что замена ССП реальной формы на ССП с эквивалентными размерами приводит к увеличению расчетного дифферента при

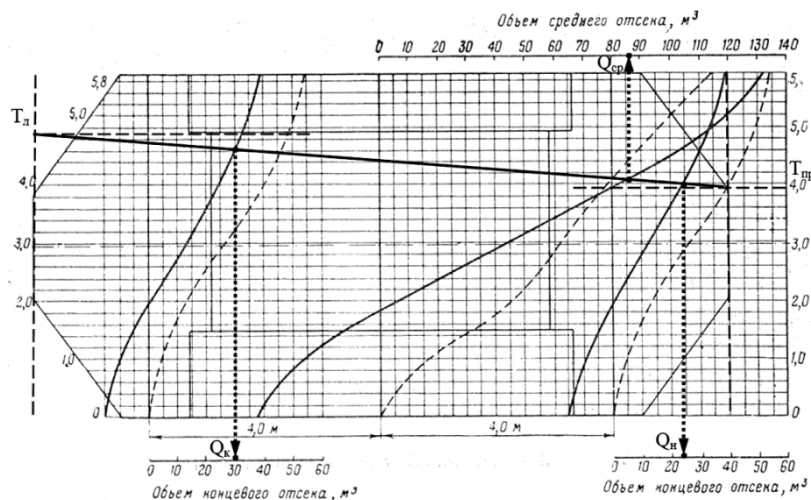


Рис. 6. Графические построения, сделанные для определения подъемной силы стального судоподъемного понтона с использованием масштаба Бонжана: Q_n , $Q_{ср}$ и Q_k – подъемная сила носового, среднего и кормового отсеков соответственно

Fig. 6. Lift force of steel salvaging pontoon as per Bonjean scale: Q_n , $Q_{ср}$ and Q_k are lift forces of forward, midship and aft compartment respectively

подъеме затонувшего объекта одной оконечностью на 4–9 % (меньшее значение при больших значениях дифферента), что приемлемо в судоподъемных расчетах. Завышенное расчетное значение дифферента является погрешностью в безопасную сторону, т.к. дифферент является лимитируемым фактором, негативно влияющим на безопасность работ.

Несущественное уменьшение точности расчетов компенсируется резким сокращением продолжительности их выполнения – не менее чем в 90 раз за счет отсутствия необходимости выполнения графических построений при использовании масштаба Бонжана.

Выводы

Conclusions

1. Автоматизация расчетов достигается при условии замены понтонов реальной формы в виде круглых цилиндров с коническими оконечностями эквивалентными понтонами в виде прямоугольных параллелепипедов соответствующей длины, высоты и ширины.
2. При острожке лагом ССП следует рассматривать как часть водоизмещающего объема поднимаемого объекта с точкой приложения подъемной силы в его центре.
3. При надпалубной острожке ССП на подкильных стропях абсцисса точки приложения подъемной силы находится в центре водоизмещающего объема, а аппликата соответствует расположению по высоте точек, относительно которых происходит отклонение стропов в сторону поднятой оконечности.
4. При надпалубной острожке ССП с точечным креплением стропов (за штоки) точка приложения подъемной силы находится в точке крепления стропов ССП к поднимаемому объекту.
5. Трудоемкость расчетов равновесного положения поднимаемого объекта существенно (на порядок) уменьшается при замене ССП реальной формы на ССП прямоугольной формы с эквивалентными размерами. При этом точность расчетов снижается незначительно с погрешностью в безопасную сторону.

Список использованной литературы

1. Спасатели Военно-морского флота / [Голубев В.Г. и др.]. Москва : Воениздат, 1996. 264 с.
2. Отчет о подъеме большого противолодочного корабля «Очаков» / НИИ спасания и подводных технологий.

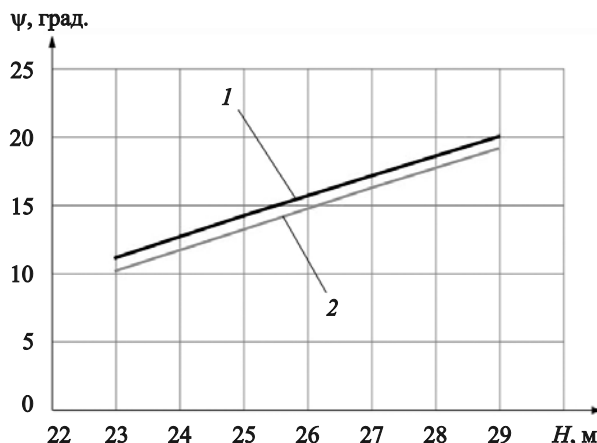


Рис. 7. Графики зависимости дифферента системы «затонувший объект – понтоны» от глубины подъема при одинаковой длине стропов: 1 – при выполнении автоматического расчета (с допущением об эквивалентном стальном судоподъемном понтоне); 2 – при выполнении ручного расчета (по масштабу Бонжана)

Fig. 7. Trim of “sunken object – pontoons” system versus salvaging depth with equal length of salvaging lines: 1 – automatic calculation (equivalent steel pontoon); 2 – manual calculation (Bonjean scale)

- Санкт-Петербург ; Ломоносов : НИИ С и ПТ, 2014. 302 с. Инв. № 1355.
3. Технический отчет о выполнении судоподъемных работ по подъему водолазного судна «ВМ-416» проекта 535 в период с 07 по 10 апреля 2014 года в районе входных молв озера Донузлав. Севастополь : УПАСР ЧФ, 2014. 28 с.
 4. Технический отчет о выполнении судоподъемных работ по подъему водолазного судна «ВМ-413» проекта 535 в период с 23 по 29 апреля 2014 года в районе входных молв озера Донузлав. Севастополь : УПАСР ЧФ, 2014. 28 с.
 5. Кабанов А.А., Краморенко А.В., Тарануха Е.В. В строгом соответствии с предназначением : Итоги деятельности научно-исследовательского управления средств и способов выполнения водолазных, глубоководных и судоподъемных работ НИИ СиПТ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» за прошедшее десятилетие // Сборник научных трудов ВУНЦ ВМФ «ВМА». Санкт-Петербург, 2022. С. 33–47.
 6. Асминин В.В., Краморенко А.В., Шайхутдинов Д.Г. Экстренный подъем списанной подводной лодки Б-380 // Информационный сборник СПАСР ВМФ. 2020. Вып. 31(67). С. 98–118.
 7. ВР.1425. Разработка технологий подъема затонувших частей корпусов танкеров «Волгонефть-212» и «Волгонефть-239» / НИИ спасания и подводных

- технологий. Санкт-Петербург ; Ломоносов : НИИ С и ПТ., 2025. 279 с.
8. Исследования направлений развития технических средств и автоматизации расчетных методик по судоподъему : отчет о НИР «Гиперион-2022» : Этап 1 / НИИ спасания и подводных технологий. Санкт-Петербург ; Ломоносов : НИИ СиПТ, 2022. С. 22–55.
 9. Справочник по расчетам при судоподъеме / [А.В. Краморенко и др.]. Москва : Воениздат, 2005. 479 с.
 10. Справочник специалиста аварийно-спасательной службы ВМФ : [в 4 ч.]. Ч. 2 : Расчеты аварийно-спасательных и судоподъемных работ / под общ. ред. Н.П. Чикера. Москва : Воениздат, 1963. 674, [1] с.

References

1. Rescuers of the Russian Navy / V.G. Golubev [et al.]. Moscow : Voensizdat, 1996. 264 p. (*in Russian*).
2. Salvaging of Ochakov large ASW ship. Report No. 1355 of Research Institute of Rescue and Underwater Technologies. 2014. 302 p. (*in Russian*).
3. Salvaging of BM-416 diving ship (Project 535) in the area of Donuzlav Lake entrance breakwaters on April 07-10, 2014. Sevastopol : Emergency Response & Rescue Department of Russian Black Sea Fleet, 2014. 28 p. (*in Russian*).
4. Salvaging of BM-413 diving ship (Project 535) in the area of Donuzlav Lake entrance breakwaters on April 23-29, 2014. Sevastopol : Emergency Response & Rescue Department of Russian Black Sea Fleet, 2014. 28 p. (*in Russian*).
5. Kabanov A.A., Kramorenko A.V., Taranukha Ye.V. Strictly as intended: Summary of activities performed by Research Department for Means and Methods of Diving, Deepwater and Salvaging Operations, Research Institute of Rescue and Underwater Technologies, N.G. Kuznetsov Naval Academy, over the last decade // Transactions of N.G. Kuznetsov Naval Academy. St. Petersburg, 2022. P. 33–47 (*in Russian*).
6. Asminin V.V., Kramorenko A.V., Shaikhutdinov D.G. Emergency salvaging of decommissioned B-380 submarine // Information Bulletin of Naval Emergency Response & Rescue Service. 2020. Vol. 31(67). P. 98–118 (*in Russian*).
7. VR.1425. Development of salvaging technologies for sunken hull parts of Volgoneft-212 and Volgoneft-239

- tankers / Research Institute of Rescue and Underwater Technologies. St. Petersburg ; Lomonosov, 2025. 279 p. (*in Russian*).
8. Fields of possible improvement in equipment and automation of salvage calculation procedures. Report about Giperion 2022 Research Project. Stage 1. St. Petersburg ; Lomonosov : Research Institute of Rescue and Underwater Technologies, 2022. P. 22–55 (*in Russian*).
9. Ship salvage calculation. Reference book / A.V. Kramorenko [et al.]. Moscow : Voensizdat, 2005. 479 p. (*in Russian*).
10. Navy Emergency Response & Rescue Serviceman's Guidebook. In 4 Parts. Part 2. Calculations of emergency response, rescue and salvaging activities / Under general editorship of N.P. Chiker. Moscow : Voensizdat, 1963. 674, [1] p. (*in Russian*).

Сведения об авторах

Салихов Дамир Фаильевич, м.н.с. научно-исследовательской лаборатории средств подъема затонувших объектов Научно-исследовательского института спасания и подводных технологий ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Адрес: 189412, Россия, Санкт-Петербург, Ломоносов, Морская ул., д. 4. E-mail: damir.salikhov.1994@mail.ru.

Краморенко Андрей Вячеславович, д.т.н., старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории средств подъема затонувших объектов Научно-исследовательского института спасания и подводных технологий ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Адрес: 189412, Россия, Санкт-Петербург, Ломоносов, Морская ул., д. 4. E-mail: vunc-vmf-5fil@mil.ru.

About the authors

Damir F. Salikhov, Junior Researcher, Salvage Equipment Laboratory, Research Institute of Rescue and Underwater Technologies, N.G. Kuznetsov Naval Academy. Address: 4, Morskaya st., Lomonosov, St. Petersburg, Russia, post code 189412. E-mail: damir.salikhov.1994@mail.ru.

Andrey V. Kramorenko, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Salvage Equipment Laboratory, Research Institute of Rescue and Underwater Technologies, N.G. Kuznetsov Naval Academy. Address: 4, Morskaya st., Lomonosov, St. Petersburg, Russia, post code 189412. E-mail: vunc-vmf-5fil@mil.ru.

Поступила / Received: 18.09.25
Принята в печать / Accepted: 14.11.25
© Салихов Д.Ф., Краморенко А.В., 2025