



**Volodymyr
V. Zaytsev**
Зайцев
Володимир
Васильович

УДК 629.12

ENGINEERING CONCEPT OF TUG COUPLING WITH AN AIR CUSHION ICEBREAKING PLATFORM

**ІНЖЕНЕРНА КОНЦЕПЦІЯ ЗЧЕПЛЕННЯ БУКСИРА
З КРИГОЛАМНОЮ ПЛАТФОРМОЮ НА ПОВІТРЯНІЙ ПОДУШЦІ**

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2025.2\(21\).02](https://doi.org/10.15589/smi2025.2(21).02)

Volodymyr V. Zaytsev¹ Зайцев Володимир Васильович,
докт. техн. наук, проф.
zv1949@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3637-9273



**Valeriy
V. Zaytsev**
Зайцев Валерій
Володимирович

Valeriy V. Zaytsev² Зайцев Валерій Володимирович,
докт. техн. наук, доц.
zvalv1974@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8590-5671

Dmytro V. Zaytsev² Зайцев Дмитро Володимирович,
канд. техн. наук, доц.
zdmvl1982@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5778-4668

Olha M. Zaytseva² Зайцева Ольга Миколаївна
magdolga1986@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3548-4220



**Dmytro
V. Zaytsev**
Зайцев Дмитро
Володимирович

¹ *Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine*

² *Design Bureau IMT, LLC, Mykolaiv, Ukraine*

¹ *Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна*

² *Дизайн бюро IMT, м. Миколаїв, Україна*



Olha M. Zaytseva
Зайцева Ольга
Миколаївна

Abstract. *Aim.* To develop the design of a coupling device that provides a rigid yet controllable connection of an LS644-type tugboat with an air cushion icebreaking platform as part of a joint icebreaking system for efficient operation in ice conditions. *Methodology.* A comprehensive design approach was used, including analysis of ice loads, dynamic simulation of the tug–platform interaction, and strength calculations of the device components. The design was carried out in accordance with classification society requirements, taking into account the specifics of ice operations and the air cushion system. The resulting design includes mounting elements on the tug and mating receiver elements on the platform to ensure quick connection and disconnection. *Results.* A new coupling device is proposed that ensures a reliable connection during ice operations while allowing angular deviations for maneuvering. The device consists of articulated joints that transmit pushing forces and ice loads while maintaining the integrity of the coupled tug–platform assembly. Calculations have confirmed a sufficient strength margin of the joint components and the system’s stability under non-uniform ice loads. *Scientific novelty.* For the first time, a coupling device for an air cushion icebreaking platform is proposed that combines a rigid connection with the possibility of controlled relative movement between the tug and

the platform. The articulated joint design accounts for the specific conditions of ice navigation and the dynamics of the air cushion, which had not been implemented in existing coupling systems. *Practical significance.* The results can be implemented in the creation of new icebreaking complexes of the “tug–platform” type. The proposed coupling device allows the use of existing tugs for ice operations, increasing the efficiency of ice convoy operations and extending the navigation season. Implementation of this development will help reduce the costs of icebreaking operations and enhance the safety of the combined system’s operation in challenging ice conditions.

Key words: tug–platform system; coupling devices; air cushion icebreaking platform; pusher tug; articulated connection; ice navigation; icebreaking operations.

Анотація. *Мета.* Розробити конструкцію зчіпного пристрою, що забезпечує жорстке, але кероване з’єднання буксира типу LS644 з криголамною платформою на повітряній подушці у складі спільної криголамної системи для ефективного руху у льодових умовах. *Методика.* Використано комплексний підхід, що передбачає аналіз льодових навантажень, динамічне моделювання взаємодії буксира з платформою та розрахунок міцності вузлів пристрою. Конструкцію спроектовано з урахуванням вимог класифікаційних нормативів і специфіки роботи повітряної подушки; передбачено елементи кріплення на буксирі та приймальні елементи на платформі для швидкого з’єднання і роз’єднання. *Результати.* Запропоновано новий зчіпний пристрій, який забезпечує надійне з’єднання під час руху в льодах і кутові відхилення для маневрування. Пристрій складається із шарнірно-зчленованих вузлів, що передають штовхальні зусилля та льодові навантаження із збереженням цілісності буксирно-платформного комплексу. Розрахунки підтвердили достатній запас міцності та стійкість системи до нерівномірних льодових впливів. *Наукова новизна.* Уперше запропоновано зчіпний пристрій для криголамної платформи на повітряній подушці, що поєднує жорсткість з’єднання з можливістю контрольованих відносних рухів буксира і платформи. Конструктивне рішення шарнірного з’єднання враховує специфіку льодових умов і динаміки повітряної подушки, що раніше не застосовувалося в існуючих системах. *Практична значимість.* Результати можуть бути впроваджені для створення нових криголамних комплексів «буксир – платформа». Запропонований зчіпний пристрій дає змогу задіяти наявні буксири для руху в льодах, що підвищує ефективність льодових проводок і розширює навігаційний період. Упровадження розробки сприятиме зниженню витрат на криголамні операції та підвищенню безпеки експлуатації комплексу в складних льодових умовах.

Ключові слова: буксирно-платформний комплекс; зчіпні пристрої; платформа на повітряній подушці; буксир-штовхач; шарнірне з’єднання; рух у льодах; криголамні операції.

References

- [1] Buck, J., & Pritchett, C.W. (1978). *Air Cushion Vehicle Icebreaker Test and Evaluation Program. Volume I: Executive Summary*. U.S. Coast Guard, Office of Research and Development, Washington, DC.
- [2] Erceg, S., & Ehlers, S. (2017). Semi-empirical level ice resistance prediction methods. *Ship Technology Research*, 64 (1), 1–14. DOI: 10.1080/09377255.2016.1277839
- [3] Fu, S., Zhang, D., Montewka, J., & Yan, X. (2016). Towards a probabilistic model for predicting ship besetting in ice in Arctic waters. *Reliability Engineering & System Safety*, 155, 124–136. DOI: 10.1016/j.res.2016.06.010
- [4] Gao, S., Zhang, J., & Zhang, J. (2018). *Jidi qidian pobing/yunshu pingtai pobing jili he guanjian jishu* [Key technology and ice-breaking mechanism of polar air-cushion ice-breaking/transportation platform]. *Ship & Boat*, 29(6), 117–122.
- [5] Hinchey, M. J. (1989). Propagation of a hovercraft air cavity under a floating ice sheet. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 111(2), 149–154.
- [6] Hinchey, M., & Colbourne, D. B. (1995). Research on low and high speed hovercraft icebreaking. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22(1), 32–42. DOI: 10.1139/195-004
- [7] Huang, Y., Sun, C., & Tian, Y. (2021). Experimental Study on Ice-Breaking Resistance of Air Cushion Platform. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 53(3), 714–727. DOI: 10.6052/0459-1879-20-418 [in Chinese].

- [8] Hu, J., & Zhou, L. (2016). Further study on level ice resistance and channel resistance for an ice-breaking vessel. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 8(2), 169–176. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2016.01.004
- [9] Jin, J., Zhou, L., Ding, S., & Gu, Y. (2021). Numerical Simulation of the Ice Breaking Process for Hovercraft. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9), 928. DOI: 10.3390/jmse9090928
- [10] Kristoffersen, Y., & Hall, J.K. (2014). Hovercraft as a mobile science platform over sea ice in the Arctic Ocean. *Oceanography*, 27(2), 170–179. DOI: 10.5670/oceanog.2014.33
- [11] Li, F., Montewka, J., Goerlandt, F., & Kujala, P. (2017). A probabilistic model of ship performance in ice based on full-scale data. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS 2017)* (pp. 540–545). DOI: 10.1109/ICTIS.2017.8047852
- [12] Liu, R., Li, X., Qian, H., & Han, D. (2023). Modeling and experimental study of the cushion lift dynamics system of a polar hovercraft. *Ocean Engineering*, 284, 115246. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115246
- [13] Lu, Z., Zhang, Z., & Li, Y. (2017). Numerical calculation of wave-making with an air cushion vehicle on the ice sheet at various traveling speeds and different river depths. *Shipbuilding of China*, 58(6), 10–18.
- [14] Mård, A. (2015). Experimental study of the icebreaking process of an icebreaking trimaran. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 2015)* (11 pages). Luleå, Sweden: POAC.
- [15] Müller, E. R. (1979). Ice breaking with an air cushion vehicle. *SIAM Review*, 21(1), 129–135.
- [16] Sun, C., Huang, Y., Tian, Y., & Sun, J. (2022). Experimental Study on Ice Breaking Mechanism of Ice-Breaking Air Cushion Platform. In *Proceedings of the 32nd International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE 2022)* (pp. 1261–1268). Shanghai, China: ISOPE.
- [17] Sun, Z., Qiu, Y., Yang, B., Jia, Z., Zhang, G., & Zong, Z. (2023). A Data-Driven Model for Ice-Breaking Resistance of Structure Based on Non-Smooth Discrete Element Method and Artificial Neural Network Method. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3), 469. DOI: 10.3390/jmse11030469
- [18] Zhou, L., Riska, K., & Ji, C. (2017). Simulating the transverse icebreaking process considering both crushing and bending failures. *Marine Structures*, 54, 167–187. DOI: 10.1016/j.marstruc.2017.04.004
- [19] Zhou, L., Diao, F., Song, M., Han, Y., & Ding, S. (2020). Calculation Methods of Icebreaking Capability for a Double Acting Polar Ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 179. DOI: 10.3390/jmse8030179
- [20] Zuev, V. A., Larina, E., Ronnov, E., & Burmistrov, E. (2022). Breaking the Ice Sheet and Extending Navigation with Hovercraft Technology. In *International Scientific Siberian Transport Forum (Trans-Siberia 2021): Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 402 (pp. 1186–1194). Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_130

Постановка задачі. Льодова навігація традиційно забезпечується потужними криголами, однак їх експлуатація надзвичайно дорога, а застосування обмежене глибинами й акваторіями. Зі зростанням обсягів морських перевезень у північних широтах виникла потреба в альтернативних технологіях для забезпечення цілорічного судноплавства в умовах льодового покриву. Одним із перспективних рішень стала **криголамна платформа на повітряній подушці (КППП)** – спеціальний *ховеркрафт*-модуль, що здатен ламати кригу завдяки повітряній подушці під корпусом та під льодом.

На відміну від традиційного криголама, який дробить лід власною масою згори,

КППП діє знизу: підводячи повітряну подушку під крижаний шар, платформа викликає його прогин і зрештою руйнування під вагою самого льоду. Такі платформи пропонують менші енерговитрати й універсальність застосування – їх можна сполучати з наявними буксирами або іншими суднами, перетворюючи останні на імprovізовані криголами для руху в складних льодових умовах.

Водночас експлуатація буксирно-платформних систем у льодах висуває нові вимоги до керованості: недостатня маневровість і контроль сполученого буксира з платформою на ковзкій льодовій поверхні створюють загрози аварій [3], зниження ефективності льодопроходу та нерівномір-

них навантажень на зчленування. Зокрема, за відсутності спеціального зчеплення платформа на повітряній подушці може неконтрольовано зміщуватися відносно буксира, що ускладнює підтримання курсу та рівномірність дії на лід.

Таким чином, постає завдання створення нового технічного рішення – **спеціалізованого зчіпного пристрою**, який забезпечить надійне кероване з'єднання буксира і криголамної платформи на повітряній подушці під час льодових операцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ідея використання суден на повітряній подушці для льодопроходу не нова: ще на початку 1970-х років проведені перші успішні експерименти з рушення у льодах за допомогою таких апаратів [1], [15]. Зокрема, буксирований повітряний катер типу АСТ-100 у Канаді долав рівний лід товщиною до ~0,7 м на швидкості ~5 км/год, а комбіноване застосування повітряно-подушної платформи з носовою частиною звичайного криголама показало зменшення льодового опору та підвищення ефективності роботи [1]. Ці результати стимулювали наукові дослідження: вже у 1980-х в СРСР опрацьовано теорію і моделі криголамних повітряних платформ – питання остійності таких суден, опору руху в льоді, впливу повітряної каверни на напружений стан льоду [5] тощо.

Після тривалої перерви інтерес до тематики відродився наприкінці 1990-х і особливо в останнє десятиріччя [6]. З'явилися нові роботи, що підтверджують ефективність *air-cushion* технологій для льодопроходу [4], [10], [13], [20]. Зокрема, проведено модельні експерименти в льодових басейнах, які пролили світло на механізм руйнування льоду повітряною подушкою: утворення стабільної підльодової повітряної порожнини спричиняє прогин криги і її згинне руйнування під власною вагою. Так, автори публікації дослідили опір руху платформ на повітряній подушці за різних висот висіння та швидкостей і виявили, що часткове розвантаження ваги на подушку (неповний режим висіння) може бути оптимальним для ламання льоду.

Практичне застосування суден на повітряній подушці для льодоочистки теж має

місце – наприклад, Канадська берегова охорона вже багато років залучає спеціальні ховеркрафти для розбивання припайного льоду та запобігання льодовим заторам на річках. Ховеркрафти типу CCGS *Sipi Muin* масою ~30 т, рухаючись зі швидкістю, генерують потужні хвилі, що дроблять кригу на дрібні фрагменти, які потім зносить течією. Це підтверджує дієвість повітряної подушки як засобу руйнування льоду в реальних умовах.

Паралельно з розвитком власне повітряно-подушних криголамів удосконалюються і засоби буксирування та зчленування суден. У практиці морських перевезень широко застосовуються **articulated tug-barge** системи (АТВ) – жорстко з'єднані буксири й баржі. Для їхнього з'єднання розроблено низку промислових рішень: наприклад, системи **Intercon** та **ЖАК**, що забезпечують механічне жорстке зчеплення буксира в спеціальній кормовій виїмці баржі. Гідравлічні або пневматичні замки фіксують буксир, допускаючи лише обертання навколо поперечної осі (диферентування), тоді як бортові та вертикальні відносні рухи блокуються. Така схема перетворює буксир і баржу на єдине хвилестійке судно, що успішно працює навіть за складних морських умов (шторми, високі хвилі).

Деякі сучасні проєкти адаптують АТВ-технологію і до льодових умов. Приміром, компанія Crowley (США) збудувала буксирно-бункерну пару *Aveogan/Oliver Leavitt* для роботи в Арктиці, оснастивши її посиленним корпусом класу Ice Class та модифікованим зчіпним пристроєм Intercon з підвищеною міцністю і спеціальним профілем (modified wave) для роботи в льодах. Водночас з'являються інноваційні концепції, що перетворюють звичайні буксири на криголами за допомогою зчіпних модулів. Зокрема, у Фінляндії розроблено знімний моторизований криголамний носовий модуль, який можна приєднувати до штатного криголамного або буксирного судна. Такий модуль обладнаний власними гвинто-рульовими колонками та приводом від гібридної енергоустановки, керується дистанційно з буксира і здатен ламати лід до 0,8 м. Випробування цього прототипу (bow module на буксирі *Calypso*)

показали, що практично будь-який буксир можна тимчасово перетворити на криголам, збільшуючи ефективність та гнучкість флоту в зимовий період.

Таким чином, огляд показує, що останніми роками інтенсивно розвиваються як конструкції криголамних платформ на повітряній подушці, так і технології їх взаємодії з буксирами. Накопичено значний науковий доробок щодо розрахунків міцності, остійності та льодоопору КППП [2], [8], [11], [19], а також досвід створення експериментальних зразків таких платформ [7], [14], [16]. З іншого боку, промисловість має готові рішення для зчленування буксирів і плавучих модулів (АТВ-зчеплення), що довели надійність у важких умовах. Це закладає підґрунтя для вирішення комплексної задачі керованого сполучення буксира з криголамною повітряною платформою. Однак, як показано нижче, специфічні аспекти взаємодії платформи на повітряній подушці з буксиром у льодах все ще залишаються поза рамками існуючих рішень.

Відокремлення невирішених частин загальної проблеми. Попри успіхи в розробці криголамних систем на повітряній подушці, на сьогодні відсутнє спеціалізоване конструктивне рішення для **зчеплення буксира з КППП** в умовах льодоходу. Існуючі зчіпні пристрої буксир – баржа розраховані на жорстке контактування сталевих корпусів і не враховують особливостей повітряної подушки та гнучкого огороження платформи. Зокрема, у режимі висіння на повітряній подушці платформа фактично не має стабілізуючого плавучого заглиблення, через що динаміка її руху суттєво відрізняється від звичайних суден [12].

Прогинання платформи від нерівностей льоду, коливання повітряного тиску в подушці, прослизання по льодовій поверхні – усі ці фактори потребують від зчіпного вузла наявності певних ступенів свободи й амортизаційних властивостей, яких стандартні АТВ-з'єднання не забезпечують. Одночасно зчеплення повинно витримувати значні змінні сили льодоопору під час ламання криги. Як зазначають дослідники, у разі руйнування суцільного льоду товщиною

0,3–0,5 м на швидкості 5–6 км/год платформа відчуває короточасні пікові навантаження, здатні досягати десятків тон. Передача таких навантажень на буксир без належного демпфірування може призвести до пошкодження корпусів або самого зчіпного пристрою. Відомі конструкції не передбачають сполучення суден із гнучкими елементами, тому проблема керованого з'єднання буксира і КППП досі лишається відкритою.

Таким чином, невирішеною частиною загальної проблеми є **розробка зчіпного пристрою, адаптованого до платформи на повітряній подушці**, який би враховував специфіку її динаміки та льодових навантажень.

Мета дослідження. Метою цього дослідження є створення нової конструкції зчіпного пристрою для криголавної платформи на повітряній подушці, що забезпечить кероване жорстко-рухоме (піддатливе) з'єднання з типовим морським буксиром у складних льодових умовах. Інакше кажучи, потрібно спроектувати й оптимізувати такий вузол зчеплення, який дасть змогу ефективно передавати зусилля та льодові навантаження, що виникають між КППП та буксиром, запобігаючи неконтрольованим взаємним коливанням і перевантаженням конструкції.

Досягнення поставленої мети передбачає: розробку загальної схеми та принципу дії зчіпного пристрою; розрахунково-експериментальну перевірку його міцності та надійності за типових льодових навантажень; а також оцінку впливу зчеплення на маневрові характеристики сполученого буксирно-платформного комплексу. Очікуваним результатом є новий інженерний засіб, що розширить можливості використання існуючих буксирів як криголамів шляхом швидкого приєднання повітряно-подушної платформи. Це сприятиме підвищенню безпеки й економічної ефективності льодової навігації у регіонах зі сезонним або постійним льодовим покривом.

Методи дослідження. У дослідженні застосовано комплекс аналітичних, числових, розрахунково-графічних та інженерних методів [9], [17], [18]. **Аналітичний підхід**

використано для оцінки льодових навантажень: визначено розрахункові сили руйнування льоду заданої товщини (до 0,6 м) на основі теоретичних моделей і попередніх експериментальних даних. Розглянуто статичний режим ламання льоду повітряною подушкою (утворення підлідної каверни та прогин льодового поля) і враховано динамічні ефекти удару крижаних уламків. **Інженерні нормативи** (правила Регістру, DNV, стандарти ISO) було залучено для встановлення граничних допустимих напружень і коефіцієнтів запасу міцності конструкції зчеплення. Для підтвердження надійності **числовими методами** проведено комп'ютерне моделювання – розрахунок напружено-деформованого стану зчіпного пристрою методом кінцевих елементів (CAE-аналіз у середовищі SolidWorks Simulation).

Моделювалися найбільш напружені елементи (пальці шарніра, бортові скоби та їх кріплення) за різних комбінацій навантажень, з особливою увагою до зон концентрації напружень. **Розрахунково-графічні підходи** передбачали просторове креслення та 3D-проектування вузла з використанням САПР, що дало змогу відобразити кінематику роботи зчеплення і взаємодію буксира з платформою у динамічних режимах. Зокрема, перевірено можливість кутових відхилень платформи за хвилювання чи нерівностей льоду, щоб зменшити пікові навантаження. Комплексна методика, що

об'єднала інженерний аналіз, розрахунки за нормативами та числове моделювання, забезпечила всебічну перевірку міцності й керованості проєктованого зчіпного пристрою.

Об'єкт дослідження. Об'єктом є криголамна платформа на повітряній подушці (КППП) як складова частина комбінованого криголамного комплексу (рис. 1). Така платформа – самохідний або напівсамохідний амфібійний засіб – здатна пересуватися над льодом завдяки повітряній подушці та може працювати спільно з буксиром-штовхачем. Платформа з'єднується з носом буксира (типу LS644-B) і разом із ним утворює єдиний буксирно-платформний комплекс, що діє як цілісний криголам.

Режим роботи в умовах льодоходу: платформа рухається попереду, підламує лід знизу, утворюючи підлідну повітряну порожнину, а буксир забезпечує штовхальне зусилля й керування курсом. При цьому уламки льоду відводяться вбік, прокладаючи шлях для судна. Платформа розрахована на руйнування принаймні однорічного рівного льоду товщиною до 0,6 м зі швидкістю руху близько 5 км/год. У складі комплексу буксир – платформа узгоджено долають льодові поля: повітряна подушка зменшує опір льоду, а тяга буксира дає змогу ламати кригу із вищою ефективністю, ніж традиційним криголамом еквівалентної потужності.

Характер взаємодії з буксиром LS644-B: у робочому положенні (на подуш-



Рис. 1. Загальний вигляд КППП

ці) платформа частково піднята над водою так, що носова частина буксира входить у спеціальну кормову виїмку платформи. Зчіпний пристрій жорстко фіксує відносне положення, передаючи всі зусилля від буксира на платформу та реакції льоду – на корпус буксира. Водночас забезпечено один ступінь свободи обертання – платформа може відхилятися в поздовжньо-вертикальній площині відносно носа буксира. Така кінематика дає змогу компенсувати різницю осадки: наприклад, у водотоннажному положенні (коли подушка відсутня і платформа опущена на воду) шарнір зчеплення нахилється приблизно на 55° , пристосовуючись до нового рівня.

Елементи платформи, що сприймають навантаження: це передусім вузли зчеплення – дві масивні бортові скоби (литі або зварні коробчасті захвати), встановлені по бортах кормової частини платформи. Вони слугують «кишенями» для пальців зчеплення, сприймаючи основні згинальні і зрізувані зусилля від тяги буксира й опору льоду. Скоби жорстко інтегровані в силову структуру корпусу платформи (через ребра жорсткості та переборки) і розраховані на екстремальні навантаження. Крім того, до навантажених елементів платформи належать опори під центральний шарнір (якщо він частково розміщений на платформі) та кріплення гідрозамків. Усі ці елементи забезпечені необхідним запасом міцності, щоб витримувати буксирне зусилля до 60 кН та ударні дії льоду без залишкових деформацій.

Предмет дослідження. Предметом є конструкція спеціального зчіпного пристрою, що з'єднує КППП з буксиром, а також процеси його проектування й розрахунку. Зчіпний пристрій має забезпечувати одночасно міцне **силове замикання** двох суден і необхідну рухливість для безпечної експлуатації. Його **функціональне призначення** – передавати повний комплекс сил, які виникають під час руху в льодах (поздовжню тягу, вертикальні реакції від підламування льоду, інерційні й ударні навантаження), не допускаючи руйнування чи роз'єднання зв'язки.

Пристрій спроектовано як механічну систему, що фактично інтегрує буксир і

платформу в єдину жорстку структуру, але з можливістю кутових відхилень у вертикальній площині. Таку **шарнірно-жорстку схему** зчеплення вибрано на основі аналізу аналогів та вимог керованості: поворотна свобода (типу Articouple) дає змогу платформі «гойдатися» відносно буксира на хвилі або нерівному льоду, гасячи пікові навантаження, тоді як відносні зміщення в горизонтальній площині повністю виключені. Це гарантує збереження курсової керованості – буксир і платформа рухаються як єдине судно, без люфтів у з'єднанні.

Конструктивно зчеплення має **три основні компоненти**: дві бортові захоплюючі скоби на платформі, що охоплюють з двох боків поперечний палець (шарнірний вал) на носі буксира, і **гідравлічні замки** фіксації. Після вводу буксира у виїмку платформи скоби захоплюють буксирний палець, утворюючи шарнір; потім гідрозамки блокують виступи скоб у гніздах на буксирі, запобігаючи мимовільному від'єднанню під навантаженням. Завдяки цьому з'єднання не має люфту та готове сприймати значні поздовжні сили.

Вимоги до міцності та керованості. Зчіпний пристрій повинен витримувати екстремальні льодові навантаження (розраховані для товщини льоду ~ 1 м із врахуванням динамічних ударів) з коефіцієнтом запасу не менше за 1,5, щоб гарантувати **безпечну експлуатацію** без пластичних деформацій чи пошкоджень. Розрахунки показали, що максимальні еквівалентні напруження в деталях вузла не перевищують 0,6–0,7 від границі плинності сталі (типу АН36), а пружні деформації становлять лише кілька міліметрів, тобто конструкція відповідає критеріям міцності.

Щодо **керованості**, то вимоги полягали в забезпеченні швидкого приєднання / від'єднання платформи, надійної фіксації без люфтів і збереженні маневрових властивостей буксира. Вибраний шарнірно-жорсткий механізм задовольняє ці критерії: даючи змогу платформі адаптуватися до хвиль і нерівностей, він одночасно підтримує єдність курсу і синхронність маневрів двох частин комплексу.

Задачі проєктування та розрахунків.

У процесі розробки зчіпного пристрою виконано кілька етапів. Спочатку сформульовано технічні вимоги: величини льодових навантажень, кінематика з'єднання (необхідні ступені свободи), габарити вузла з урахуванням конструкції буксира LS644-B, а також умови експлуатації (температурний діапазон, корозійна стійкість тощо). На основі вимог розглянуто два варіанти конструктивної схеми – повністю жорстке зчеплення та шарнірно-артикульоване – з аналізом їх переваг і недоліків.

Вибрано оптимальну схему (шарнір з однією вільною вісю повороту) як таку, що забезпечує баланс міцності та гнучкості. Далі здійснено попередній розрахунок основних елементів зчеплення методами опору матеріалів – зокрема, оцінено несучу здатність пальця на зріз і згин, міцність скоб захоплення на відрив та роздавлення, міцність кріплень і гідрозамків. Після цього побудовано 3D-модель вузла і проведено детальний аналіз методом кінцевих елементів для верифікації результатів.

На 3D-моделях отримано розподіли еквівалентних напружень, виявлено критичні зони (в основі пальця та в кутах скоб) і перевірено, що напруження не перевищують допустимих. Конструкція зчіпного пристрою задовольняє усі висунуті вимоги: вона забезпечує необхідну **міцність, надійність і керованість**, а отже, може бути рекомендована до практичного впровадження в криголамних комплексах нового типу.

Основний матеріал: конструкція та функціонування зчіпного пристрою для ЛПВП

– Загальна схема зчіпного пристрою

На платформі встановлено дві масивні бортові скоби-захвати, розташовані по обидва боки від її центральної осі. На носі буксира передбачено поперечний циліндричний **шарнірний палець**, який входить між скобами платформи, утворюючи горизонтальний шарнір. Після заходу пальця в захвати відбувається замикання: **гідравлічні замки** фіксують з'єднання, блокуючи виступи скоб у відповідних **посадкових гніздах** на буксирі (рис. 2).

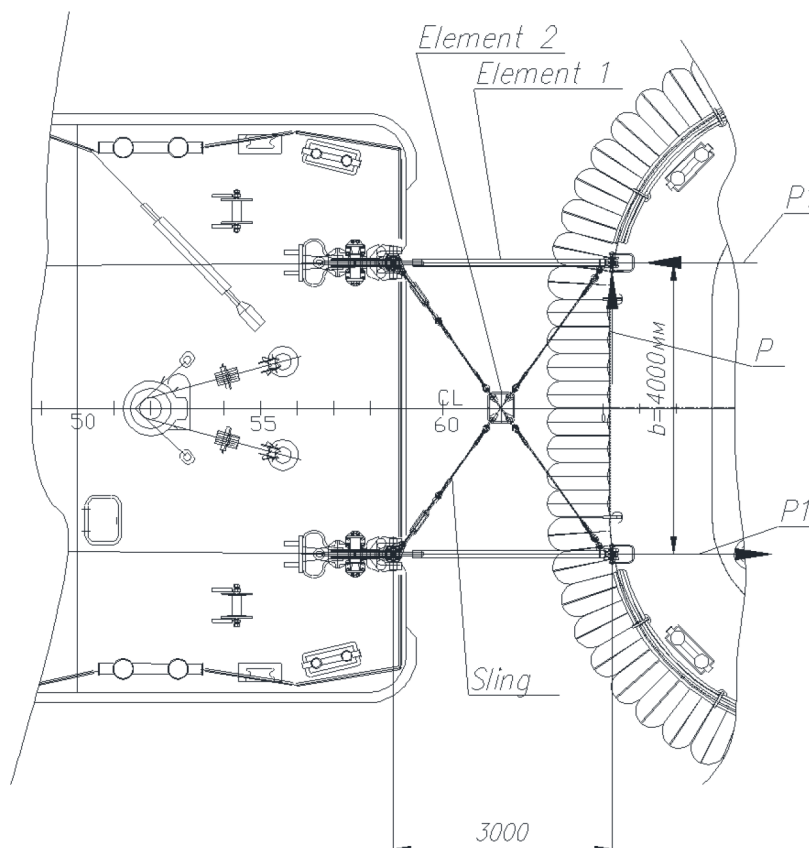


Рис. 2. Схема зчеплення криголавної платформи на повітряній подушці з буксиром (вид зверху)

Завдяки цьому платформа жорстко з'єднується з буксиром без люфтів, формуючи єдиний буксирно-платформний комплекс для роботи в льодах. Відстань між осями бортових скоб становить близько $b = 4000$ мм, що задає ширину зчеплення. Застосована схема містить мінімум елементів і забезпечує швидке приєднання / від'єднання платформи від буксира в разі потреби (через розблокування гідрозамків).

– Основні компоненти пристрою

Зчіпний пристрій складається з кількох ключових елементів, інтегрованих у конструкції платформи та буксира (рис. 2). **Бортові скоби** (кронштейни захвату), змонтовані на кормі платформи, виконані як міцні сталеві коробчасті деталі (литі або зварні). Вони охоплюють палець буксира з двох боків, слугуючи «обіймами» шарнірного з'єднання. **Шарнірний палець** (поперечна цапфа) закріплений на носі буксира і виступає як вісь шарніра; можливе його виконання у вигляді сферичного шарніра або поперечного вала в рамній конструкції. Саме на пальці платформа може хитатися у вертикальній площині. Для кінцевого замикання застосовані **гідравлічні замки** – приводи, що після входження пальця автоматично блокують скоби, заціплюючи їх у спеціальних **гніздах** на буксирі. Замки унеможливають мимовільне роз'єднання зчеплення під навантаженням і забезпечують передачу тягового зусилля без зазорів. Крім того, до складу зчіпного вузла входять допоміжні **кріпильні елементи** – високоміцні болти та шворні, що фіксують скоби на корпусі платформи й розподіляють навантаження в місцях кріплення. Усі компоненти виготовлені зі сталі підвищеної міцності (типу АН36) для роботи в суворих льодових умовах.

– Кінематика роботи зчеплення

Конструкція зчіпного пристрою забезпечує одну рухому ступінь свободи між платформою та буксиром – кутове відхилення у вертикальній площині. Фактично платформа може «гойдатися» носовою частиною вгору-вниз відносно буксира, тоді як бокові зміщення й повороти навколо вертикальної осі виключені. Така кінематична схема називається *шарнірно-жорсткою*: у

горизонтальній площині з'єднання жорстке (платформа завжди спрямована по курсу буксира), а у вертикальній – рухоме.

Рухомість у вертикальній площині потрібна для компенсації нерівностей льодової поверхні, хвилювання на воді та зміни осадки платформи. Наприклад, за переходу з режиму повітряної подушки у водотоннажний платформу доводиться опустити – шарнірний вузол при цьому нахилиється приблизно на 55° , компенсуючи різницю рівнів. На рис. 3 схематично показано це положення: платформа осіла, і палець разом зі скобами повернувся вниз. У робочому режимі на подушці, навпаки, платформа піднята і шарнір вирівнюється майже горизонтально (рис. 4). Таким чином, зчеплення надійно працює в усіх експлуатаційних режимах – як коли платформа спирається на повітряну подушку, так і коли вона діє як звичайне судно без підтримки подушки.

У разі стикування буксира з платформою забезпечується технологічна зручність зчеплення: завдяки конічним напрямним поверхням на скобах і пальці елементи легко входять у зачеплення зі зближенням суден. Після центрування пальця між скобами гідрозамки здійснюють автоматичне замикання, тому процес приєднання швидкий і не потребує ручного втручання. Для від'єднання достатньо подати команду на гідросистему замків – і платформа відчепиться від буксира протягом кількох секунд (за умови припинення тягового зусилля). Це особливо важливо в екстрених ситуаціях, коли потрібне негайне роз'єднання комплексу.

– Функціональні переваги конструкції

Розроблений зчіпний пристрій має низку важливих переваг для експлуатації у льодових умовах. **Надійність** з'єднання забезпечується жорсткою фіксацією платформи на буксирі без люфтів, що унеможливорює ударні навантаження від раптових переміщень або скручування вузла. Конструкція замків не допускає самочинного розчеплення навіть за значних динамічних впливів льоду. Одночасно **плавність роботи** вузла досягається завдяки шарнірній рухомості: платформа може відхилятися на шарнірі в

Mode 2 (displacement position of the device)

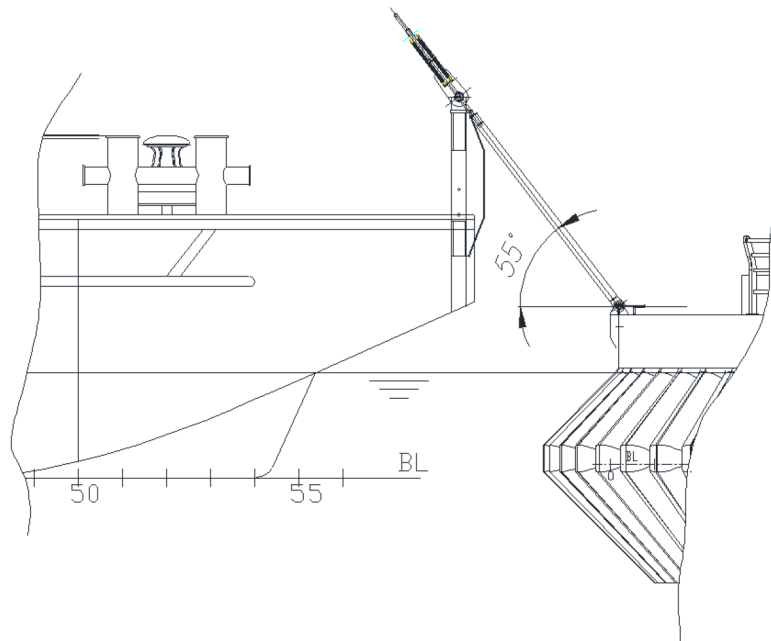


Рис. 3. Водотоннажне положення пристрою (вид збоку)

Mode 1 (working position of the device)

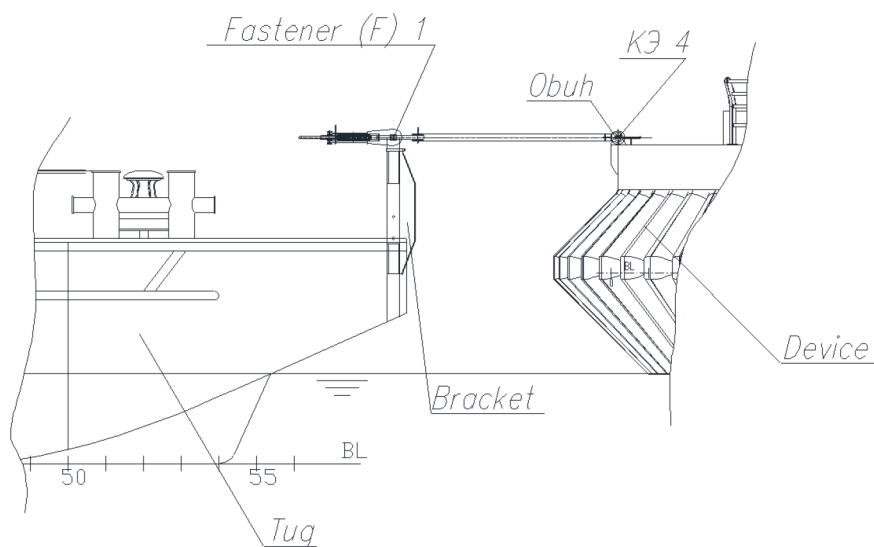


Рис. 4. Робоче положення пристрою (вид збоку)

разі наїзду на крижані нерівності, *гасячи* пікові напруження й удари, що підвищує **безпеку** роботи комплексу.

До переваг належить і **швидкість з'єднання / роз'єднання**: використання гідроприводних замків дає змогу приєднати платформу до буксира за лічені хвилини, а від'єднати – за секунди, що дуже цінно в умовах плаваючих криг або надзвичайних ситуацій. Це значно скорочує непродуктив-

ний час підготовки до роботи. **Універсальність** і зручність: платформа може стикуватися з різними буксирами, оснащеними відповідним пальцем, що робить систему гнучкою в застосуванні.

У льодових умовах запропонована схема зчеплення підвищує **ефективність і безпеку** операцій. По-перше, комплекс з буксира й повітряної платформи може діяти навіть на мілководді та болотистих акваторіях,

куди звичайний криголам не дістанеться. По-друге, навантаження від льоду розподіляються між двома компонентами: платформа підламає лід знизу, зменшуючи опір, а буксир додає тягу – разом вони долають льодовий покрив із меншими зусиллями та вищою швидкістю руйнування льоду. Таким чином, зменшуються і удари по корпусу буксира, і ризик пошкоджень платформи, оскільки шарнір дає змогу їй відпрацьовувати контакт із льодом. Розрахунки показали, що міцність усіх елементів зчеплення із запасом відповідає вимогам: навіть у разі ламання льоду товщиною ~1 м конструкція лишається в пружній зоні та не зазнає пошкоджень. Це підтверджує високий рівень надійності й безпеки запропонованого пристрою в реальних умовах експлуатації.

– Основні технічні характеристики

Запроектований зчіпний пристрій розрахований на значні навантаження, що виникають під час льодового плавання. Зокрема, максимальне тягове зусилля буксира становить **6 тонн** (≈ 60 кН) – саме під такий упор буксира спроектовано вузол зчеплення. Базове льодове навантаження відповідало пролому рівного однорічного льоду товщиною до **0,3 м** на швидкості ~ 5 км/год.

Усі основні деталі зчіпного пристрою виготовлені зі сталі марки, еквівалентної суднобудівній сталі **АН36** (міцність якої перевищує звичайну сталь А). Мінімальний межовий опір плинності для вибраного матеріалу – ~ 355 МПа, що забезпечує необхідний запас міцності.

Розрахункове допустиме напруження для конструкції визначалося за класифікацією: $[\sigma] = \sigma_r / k$ (де σ_r – межа плинності, k – коефіцієнт запасу). Якщо $\sigma_m = 355$ МПа і $k = 1,25$, маємо $[\sigma] = 284$ МПа.

Однак у більш консервативному підході брали $\sigma_m = 235$ МПа (сталь А) для порівняння з результатами – тоді $[\sigma] = 188$ МПа.

Допустиме дотичне напруження приймалося $[\tau] = 0,57 \cdot [\sigma]$ (близько 107 МПа, якщо $[\sigma] = 188$ МПа). Вибір такої сталі та зазначених допусків гарантує, що навіть максимально можливі напруження не досягнуть критичних значень, а деформації вузла будуть пружними.

Габаритні розміри зчіпного пристрою визначаються габаритами платформи та буксира. Поперечний палець на носі буксира має діаметр, достатній для сприйняття згинальних моментів від платформи (порядку сотень міліметрів, точне значення визначалося розрахунком на міцність). Відстань між осями бортових скоб платформи – ~ 4 м, як зазначено вище.

Це забезпечує широке рознесення точок опори і зменшує навантаження на кожному скобу. Зазори в зачепленні мінімізовані конструктивно й вибираються гідрозамками, тому люфти практично відсутні. Таким чином, геометричні та матеріальні параметри пристрою підібрані так, щоб гарантувати роботу зчеплення без залишкових деформацій за розрахункових навантажень і забезпечити ресурс роботи вузла не менше ніж 20 років в умовах змінних льодових навантажень.

– Результати перевірки міцності (CAE-аналіз)

Для точнішої оцінки напружень і деформацій був виконаний комп'ютерний аналіз методом скінченних елементів (CAE) у середовищі *SolidWorks Simulation*. Розрахунок проведено для двох основних режимів роботи платформи: на повітряній подушці (режим 1) та у водотоннажному стані (режим 2), що відповідає різним кутам нахилу шарніра і характеру льодових навантажень. На рис. 5 наведено карту еквівалентних напружень (за Мізесом) в елементах зчеплення під дією розрахункових навантажень. Як видно з діаграми напружень, максимальні значення (160–170 МПа) виникають у найбільш навантажених зонах – біля основи пальця та в кутах скоб-захватів. Ці напруження позначені червоним кольором і становлять 60–70 % від межі текучості матеріалу, що відповідає коефіцієнту запасу 1,5–1,7. Таким чином, навіть у найбільш напружених точках конструкції запас міцності є достатнім і напруження не досягають пластичних значень.

На рис. 5 також продемонстровано деформовану форму центрального пальця (масштабовано для наочності). Максимальний прогин пальця становить лише кілька міліметрів, що підтверджує високу жор-

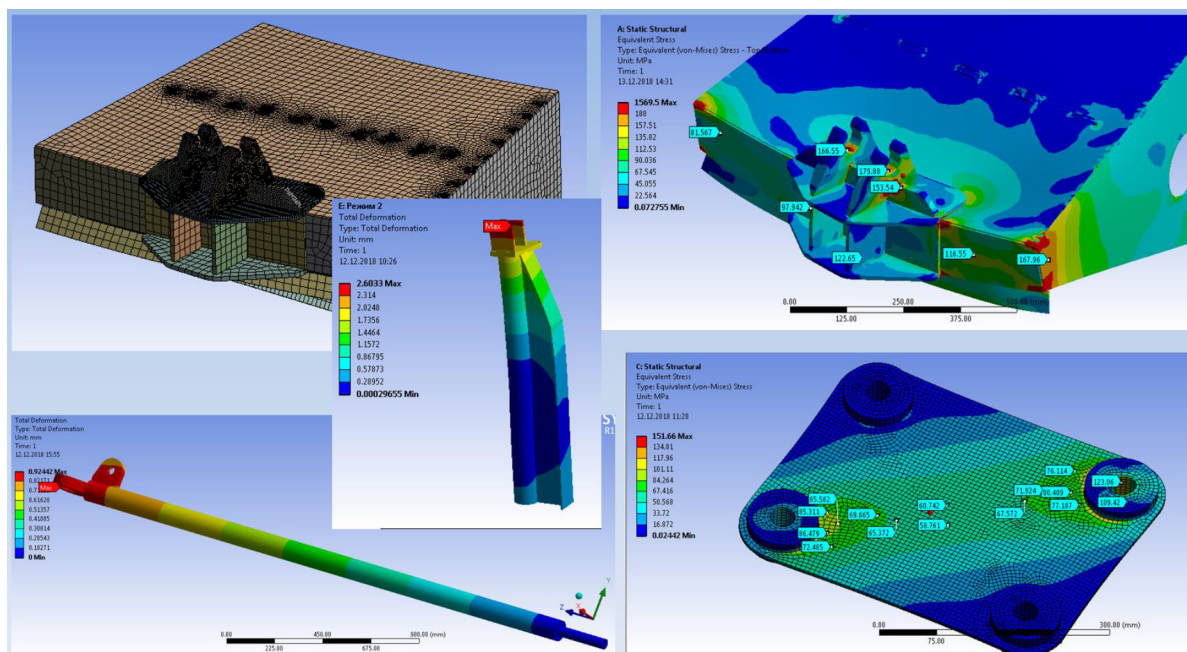


Рис. 5. Основні результати САЕ-аналізу

сткість зчеплення. Невеликі пружні переміщення елементів (порядку 3–5 мм) жодним чином не заважають роботі вузла і є прийнятними для конструкції такого типу. Результати чисельного моделювання узгоджуються з аналітичними оцінками міцності: у жодному з елементів не виявлено перевищення допустимих напружень або появи зон пластичних деформацій.

Отримані значення підтверджують, що конструкція працює в межах пружної роботи матеріалу. Таким чином, інженерний аналіз і чисельне моделювання доводять достатню міцність і жорсткість зчіпного пристрою за заданих навантажень.

Обговорення отриманих результатів.

Отримані результати проектування та розрахунку зчіпного пристрою підтверджують висунуті на початку дослідження гіпотези. Розрахунковий аналіз показав, що максимальні напруження у ключових елементах (пальці, скоби тощо) не перевищують 60–70 % від границі плинності матеріалу (сталі високої міцності типу Grade AН36), що відповідає коефіцієнту запасу міцності 1,5–1,7. Такий результат узгоджується з очікуваннями надійності конструкції: зчіпний пристрій витримує розрахункові льодові навантаження (руйнування льоду товщиною до 0,6 м на швидкості ~5 км/год) без залишкових деформацій.

Виявлено незначні пружні прогини елементів під навантаженням, які не заважають нормальній роботі вузла, що свідчить про достатню жорсткість і одночасно пружність системи.

Важливо, що отримані дані відповідають тенденціям, відомим із попередніх досліджень. Ще канадські випробування 1970-х років продемонстрували, що поєднання судна на повітряній подушці з носом криголама або буксира підвищує ефективність ламання льоду. Наші результати фактично підтверджують цю концепцію: платформа на повітряній подушці, з'єднана з буксиром типу LS644, діє як єдиний комплекс, здатний долати лід із меншим опором, ніж традиційний криголам аналогічної потужності. Таким чином, практичний ефект від впровадження зчіпного пристрою узгоджується з очікуваннями – підвищення продуктивності криголамних робіт без збільшення енергетичних витрат.

У порівнянні з аналогами та попередніми підходами слід відзначити наукову новизну запропонованої конструкції. У світовій практиці відомі системи жорсткого зчеплення буксира з несамохідною частиною, наприклад фінська система **Finnpusku**, що використовує триточкове механічне з'єднання і фактично перетворює буксир з баржею на єдине судно. Такий жорсткий підхід забез-

печує синхронність руху, але не допускає відносних рухів і потребує надвисокої міцності вузла.

Альтернативою є шарнірні зчеплення на кшталт японської системи **Articouple K**, яка допускає поворотні рухи між буксиром і баржею, зменшуючи пікові навантаження. Розроблений у цій роботі зчіпний пристрій поєднує переваги обох підходів, виступаючи прикладом **шарнірно-ригідної** схеми. З одного боку, конструкція унеможлиблює відносні зсуви платформи та буксира в горизонтальній площині, завдяки чому зберігається єдиний курс і керованість комплексу.

З іншого боку, центральний шарнір («палець») дає один ступінь свободи – кутове відхилення у вертикальній площині, що дає змогу платформі відносно буксира здійснювати невеликі поворотні рухи (диферент) в разі наїзду на нерівності льоду чи під дією хвиль.

Це інженерне рішення забезпечує компенсацію крутних моментів і ударних навантажень завдяки пружному повороту, розвантажуючи зчеплення від екстремальних піків напружень. Таким чином, підтверджено правомірність початкового припущення щодо оптимальності шарнірно-ригідної схеми зчеплення для цих умов експлуатації.

Наведене обговорення демонструє, що отримані результати не тільки відповідають очікуванням, але й підтверджують наукову та практичну доцільність запропонованого інженерного рішення. Наукова новизна роботи полягає у поєднанні концепції повітряно-подушної криголамної платформи з існуючим буксиром через оригінальний зчіпний пристрій, здатний забезпечити баланс між жорсткістю і гнучкістю з'єднання.

Практичне значення результатів полягає в тому, що створено реальний технічний засіб для реалізації цієї концепції – пристрій, який можна впровадити на флоті для підвищення ефективності льодових проводок. Попередні гіпотези про ефективність комбінованої роботи платформи та буксира повністю підтверджено: конструкція зчеплення виявилася спроможною передавати значні зусилля руйнування льоду без руйнування себе, а гіпотеза щодо необхідності шарнірного елемента для розвантаження

ударів визнана правильною на основі проведених розрахунків.

Висновки. На основі виконаних досліджень і розрахунків сформульовано такі основні висновки:

- **Розроблено та проаналізовано новий зчіпний пристрій** для з'єднання криголамної платформи на повітряній подушці з буксиром типу LS644. Конструкція забезпечує **надійне жорстко-шарнірне з'єднання**, що утворює єдиний буксирно-платформний комплекс для ефективної роботи в льодах.

- **Підтверджено ефективність і міцність** запропонованого пристрою: розрахункові комбінації льодових навантажень (руйнування льоду товщиною до 0,6 м за 5 км/год) не викликають пластичних деформацій елементів. Максимальні еквівалентні напруження становлять 0,6–0,7 від границі текучості матеріалу, тобто конструкція має достатній запас міцності для безпечної експлуатації.

- **Встановлено оптимальність шарнірно-ригідної схеми** зчеплення для льодових умов: вона унеможлиблює відносні зміщення платформи та буксира в горизонтальній площині, забезпечуючи синхронність руху, але допускає кутові відхилення у вертикальній площині. Це рішення дає змогу компенсувати ударні навантаження та крутні моменти під час проламування льоду, зменшуючи пікові зусилля на зчеплення й корпуси суден.

- **Практична цінність пристрою** полягає у вирішенні проблеми інтеграції КППП з буксиром для спільного льодоплавання. Впровадження розробленого зчіпного пристрою дасть змогу підвищити ефективність льодових проводок (шляхом зменшення опору руйнуванню льоду й раціональнішого використання потужності), знизити навантаження на корпуси буксирів та криголамів завдяки гасінню ударів, а також **розширити сферу застосування** криголамної техніки на мілководні акваторії та прибережні зони, недоступні для звичайних криголамів [20]. Це сприяє розвитку більш мобільних і економічних засобів льодового провадження.

- **Перспективи подальших досліджень** бачаться у вдосконаленні конструкції та

підготовці до впровадження. Потрібні такі кроки: проведення натурних випробувань пристрою в реальних льодових умовах з буксиром типу LS644 для підтвердження розрахункових прогнозів; оптимізація матеріалів і геометрії вузлів зчеплення з метою підвищення ресурсу та надійності; дослідження можливостей масштабування платформи і зчіпного вузла для роботи з більшими судна-

ми або в товстішому льоду. Подальша увага має бути приділена автоматизації процесу зчеплення / розчеплення та системам моніторингу навантажень у вузлі під час експлуатації. Реалізація цих заходів забезпечить успішне впровадження розробленого пристрою у практику та сприятиме розвитку технологій криголамних платформ на повітряній подушці в інтересах морської інфраструктури.

Список літератури

- [1] Buck J., & Pritchett C.W. *Air Cushion Vehicle Icebreaker Test and Evaluation Program. Volume I: Executive Summary*. U.S. Coast Guard, Office of Research and Development, Washington, DC, 1978.
- [2] Erceg S., & Ehlers S. Semi-empirical level ice resistance prediction methods. *Ship Technology Research*. 2017. Vol. 64 (1). P. 1–14. DOI: 10.1080/09377255.2016.1277839
- [3] Fu S., Zhang D., Montewka J., & Yan X. Towards a probabilistic model for predicting ship besetting in ice in Arctic waters. *Reliability Engineering & System Safety*. 2016. Vol. 155. P. 124–136. DOI: 10.1016/j.res.2016.06.010
- [4] Gao S., Zhang J., & Zhang J. *Jidi qidian pobing/yunshu pingtai pobing jili he guanlian jishu* [Key technology and ice-breaking mechanism of polar air-cushion ice-breaking/transportation platform]. *Ship & Boat*. 2018. Vol. 29(6). P. 117–122 [in Chinese].
- [5] Hinchey M. J. Propagation of a hovercraft air cavity under a floating ice sheet. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 1989. Vol. 111(2). P. 149–154.
- [6] Hinchey M., & Colbourne D. B. Research on low and high speed hovercraft icebreaking. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1995. Vol. 22(1). P. 32–42. DOI: 10.1139/195-004
- [7] Huang Y., Sun C., & Tian Y. Experimental Study on Ice-Breaking Resistance of Air Cushion Platform. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2021. Vol. 53(3). P. 714–727. DOI: 10.6052/0459-1879-20-418
- [8] Hu J., & Zhou L. Further study on level ice resistance and channel resistance for an icebreaking vessel. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2016. Vol. 8(2). P. 169–176. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2016.01.004
- [9] Jin J., Zhou L., Ding S., & Gu Y. Numerical Simulation of the Ice Breaking Process for Hovercraft. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(9). P. 928. DOI: 10.3390/jmse9090928
- [10] Kristoffersen Y., & Hall J.K. Hovercraft as a mobile science platform over sea ice in the Arctic Ocean. *Oceanography*. 2014. Vol. 27(2). P. 170–179. DOI: 10.5670/oceanog.2014.33
- [11] Li F., Montewka J., Goerlandt F., & Kujala P. A probabilistic model of ship performance in ice based on full-scale data. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Transportation Information and Safety 2017 (ICTIS 2017)* (pp. 540–545). DOI: 10.1109/ICTIS.2017.8047852
- [12] Liu R., Li X., Qian H., & Han D. Modeling and experimental study of the cushion lift dynamics system of a polar hovercraft. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 284. P. 115246. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115246
- [13] Lu Z., Zhang Z., & Li Y. Numerical calculation of wave-making with an air cushion vehicle on the ice sheet at various traveling speeds and different river depths. *Shipbuilding of China*. 2017. Vol. 58(6). P. 10–18.
- [14] Mård A. Experimental study of the icebreaking process of an icebreaking trimaran. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions 2015 (POAC 2015)* (11 pages). Luleå, Sweden: POAC.
- [15] Müller E. R. Ice breaking with an air cushion vehicle. *SIAM Review*. 1979. Vol. 21(1). P. 129–135.
- [16] Sun C., Huang Y., Tian Y., & Sun J. Experimental Study on Ice Breaking Mechanism of Ice-Breaking Air Cushion Platform. In *Proceedings of the 32nd International Ocean and Polar Engineering Conference 2022 (ISOPE 2022)* (pp. 1261–1268). Shanghai, China: ISOPE.

- [17] Sun Z., Qiu Y., Yang B., Jia Z., Zhang G., & Zong Z. A Data-Driven Model for Ice-Breaking Resistance of Structure Based on Non-Smooth Discrete Element Method and Artificial Neural Network Method. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11(3). P. 469. DOI: 10.3390/jmse11030469
- [18] Zhou L., Riska K., & Ji C. Simulating the transverse icebreaking process considering both crushing and bending failures. *Marine Structures*. 2017. Vol. 54. P. 167–187. DOI: 10.1016/j.marstruc.2017.04.004
- [19] Zhou L., Diao F., Song M., Han Y., & Ding S. Calculation Methods of Icebreaking Capability for a Double Acting Polar Ship. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8(3). P. 179. DOI: 10.3390/jmse8030179
- [20] Zuev V.A., Larina E., Ronnov E., & Burmistrov E. Breaking the Ice Sheet and Extending Navigation with Hovercraft Technology. In *International Scientific Siberian Transport Forum 2022 (Trans-Siberia 2021): Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 402* (pp. 1186–1194). Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_130

© Зайцев В. В., Зайцев В. В., Зайцев Д. В., Зайцева О. М.

Дата надходження статті до редакції: 25.05.2025

Дата затвердження статті до друку: 20.06.2025

Дата публікації статті: 04.11.2025

