

УДК 629.5.023
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.2](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.2)

FEATURES OF CALCULATIONS OF OVERALL LONGITUDINAL STRENGTH WHEN DESIGNING STRUCTURES OF SMALL HDPE VESSELS

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКІВ ЗАГАЛЬНОЇ ПОЗДОВЖНЬОЇ МІЦНОСТІ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ КОНСТРУКЦІЙ МАЛИХ СУДЕН ІЗ HDPE

Igor V. Lysytskyi¹
igor.lisitsky@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1505-199X

Anatoliy I. Kuznetsov²
anatolii.kuznetsov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5149-3181

Oleksandr V. Shchedrolosiev²
oleksandr.shchedrolosiev@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-7972-3882

Hanna V. Konovalova²
hanna.konovalova@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0003-1215-849X

І. В. Лисицький¹,
аспірант

А. І. Кузнєцов²,
канд. техн. наук, доцент

О. В. Щедролосоєв²,
докт. техн. наук, професор

Г. В. Коновалова²,
канд. техн. наук, доцент

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

²*Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson*

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

²*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон*

Abstract. Directions for further research are proposed regarding the calculation of the overall longitudinal strength for small vessels made of high-density polyethylene. In order to assess the overall longitudinal strength using the example of a small vessel made of HDPE with a hydrodynamic scheme – a trimaran, appropriate calculations were carried out. Analysis of the research results shows that when calculating the overall longitudinal strength of small vessels with HDPE structures, it is impossible to obtain correct results without taking into account the extreme temperature conditions of the structures' operation.

In addition, when considering the option of loads when lifting on slings, the calculation results should be considered in accordance with the general calculation scheme of the vessel in motion, but with the application of the appropriate calculation load scheme.

Also, in the case of storing the vessel on keel blocks, it is necessary to take into account the duration of storage and possible temperature storage conditions (hangar, open area).

Purpose. It consists in determining the features of calculations of overall longitudinal strength when designing structures of small vessels made of HDPE.

Methodology. The research methodology is based on calculations of the overall longitudinal strength of small vessels using structural mechanics methods, taking into account the characteristics of the hull structure material (HDPE), the variety of ratios of the main dimensions of the vessels being designed, load cases, and temperature conditions that will arise during operation.

Results. Analysis of the research results demonstrates that when calculating the overall longitudinal strength of small vessels with HDPE structures, it is necessary to take into account extreme temperature conditions of operation of structures, duration of load application, and storage conditions on keel blocks.

The general approach to standardizing the overall longitudinal strength should include a study of the stability of the floor panels.

In general, a separate approach is needed to standardize the overall longitudinal strength of small vessels with structures made of the material under consideration.

This can introduce additional adjustments to the general calculation scheme.

Scientific novelty. It consists in determining the directions of further research on the calculations of the overall longitudinal strength of small vessels made of HDPE, taking into account that the results of the study established a significant influence of the temperature factor of operating conditions, the duration of load application, load cases, and

the ratio of the main dimensions on the overall longitudinal strength of small vessels made of HDPE.

Practical significance. The positive trend in the growth of the number of service and auxiliary fleet vessels with HDPE assumes the presence of a correct methodology for calculating the overall longitudinal strength.

The significant dependence of the overall longitudinal strength of small vessels made of HDPE on the temperature regimes of operation, duration of application and loading cases, and the ratio of the main dimensions implies the presence of a separate approach to the standardization of the overall longitudinal strength, since the requirements of classification societies currently do not contain relevant recommendations, taking into account the need to determine acceptable dimensions of hull structures.

Key words: overall longitudinal strength; small vessels; high-density polyethylene; thermo-viscoelasticity; creep.

Анотація. Запропоновано напрями подальших досліджень щодо розрахунку загальної поздовжньої міцності для малих суден із поліетилену високої щільності. З метою оцінки загальної поздовжньої міцності на прикладі малого судна з HDPE з гідродинамічною схемою – тримаран, проведено відповідні розрахунки.

Аналіз результатів дослідження показує, що при розрахунках загальної поздовжньої міцності малих суден з конструкціями із HDPE неможливо отримати коректні результати без урахування екстремальних температурних режимів експлуатації конструкцій.

Крім того, у разі розгляду варіанта навантажень при підйомі на стропах результати розрахунків мають розглядатися відповідно до загальної розрахункової схеми судна у русі, але із застосуванням належної схеми розрахункових навантажень.

Також у випадку зберігання судна на кільблоках необхідно враховувати тривалість зберігання та можливі температурні умови зберігання (ангар, відкритий майданчик).

Мета. Полягає у визначенні особливостей розрахунків загальної поздовжньої міцності при проектуванні конструкцій малих суден із HDPE.

Методика. Методика дослідження базується на розрахунках загальної поздовжньої міцності малих суден методами будівельної механіки з урахуванням особливостей матеріалу корпусних конструкцій (HDPE), різноманітності співвідношення головних розмірів суден, що проектуються, випадків навантажень та температурних умов, що виникатимуть у ході експлуатації.

Результати. Аналіз результатів дослідження демонструє, що при розрахунках загальної поздовжньої міцності малих суден з конструкціями із HDPE необхідно враховувати екстремальні температурні режими експлуатації конструкцій, тривалість докладання навантажень, умови зберігання на кільблоках.

Загальний підхід до нормування загальної поздовжньої міцності повинен містити дослідження стійкості панелей перекриттів.

Загалом, необхідний окремий підхід до нормування загальної поздовжньої міцності малих суден з конструкціями з матеріалу, що розглядається.

Це здатне внести додаткові корективи до загальної схеми розрахунку.

Наукова новизна. Полягає у визначенні напрямків подальших досліджень щодо розрахунків загальної поздовжньої міцності малих суден з HDPE, беручи до уваги, що за результатами дослідження встановлено суттєвий вплив температурного фактору умов експлуатації, тривалості прикладання навантаження, випадків навантажень, співвідношення головних розмірів, на загальну поздовжню міцність малих суден з HDPE.

Практична значимість. Позитивна тенденція щодо зростання кількості суден службово-допоміжного флоту з HDPE передбачає наявність коректної методики розрахунку загальної поздовжньої міцності.

Суттєва залежність загальної поздовжньої міцності малих суден з HDPE від температурних режимів експлуатації, тривалості прикладання та випадків навантажень, співвідношення головних розмірів передбачає наявність окремого підходу до нормування загальної поздовжньої міцності, оскільки вимоги класифікаційних товариств, на даний час, не містять відповідних рекомендацій, з урахуванням необхідності визначення прийнятних розмірів корпусних конструкцій.

Ключові слова: загальна поздовжня міцність; малі судна; поліетилен високої щільності; термо-в'язко-пружно-пластичність; повзучість.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задачею дослідження є визначення особливостей розрахунків загальної поздовжньої міцності при проектуванні конструкцій малих суден із HDPE.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

I ПУБЛІКАЦІЙ

1. Особливості механічних характеристик матеріалу та механізм руйнування

1.1 Розтягування та вигин

Поліетилен високої щільності (HDPE) – високов'язкопружний матеріал, що під дією постійного напруження спочатку пружно деформується, потім повільно тече (повзе), а після певного часу руйнується, навіть якщо напруження, що виникають, менші за миттєву межу міцності. Механічні властивості HDPE наведено у [3, с. 19; 4; 5].

Беручи до уваги зазначене, можна зауважити, що навантаження, що руйнують, з часом, експоненційно зменшуються. Експериментальні дані щодо залежності часу руйнування від величини напружень наведено у табл. 1 [6].

Таблиця 1. Типові експериментальні дані (HDPE, 20–23 °C)

Напруження σ , МПа	Час до руйнування, t
30	секунди – хвилини
26	~1 година
22	~10 годин
20	~100 годин
16	~1000 годин
13	~10 ⁴ годин
10	~10 ⁵ годин
8–9	~10 ⁶ годин (~50–100 років)

При цьому, під дією постійного напруження руйнація відбувається через певний час. Чим менше напруження, тим довше матеріал витримує навантаження.

Заслуговує на увагу характерний механізм руйнування, що дозволяє розрізнити три області довговічності:

1. короткочасна область, з характерними для неї великими напруженнями, пластичним характером руйнування, що відбувається за період секунди – хвилини.

2. область в'язкопружної повзучості з повільним накопиченням деформації та періодом руйнування години – місяці.

3. область повільного зростання тріщин (SCG – Slow Crack Growth), під час якої відбувається утворення мікротріщин та крихке руйнування протягом періоду років – десятиліть.

Більш докладно з особливостями механізму в'язкопружної поведінки матеріалу можливо ознайомитись у [3, с. 87; 6, с. 75, с. 82].

Наведений механізм руйнування у контексті даного дослідження може привести до втрати стійкості елементів корпусних конструкцій [6, с. 287].

Втрата стійкості елементів конструкцій з HDPE – це форма деформації або руйнування, що виникає при стисканні або згинанні, коли елемент конструкції раптово втрачає здатність зберігати початкову форму і витримувати розрахункове навантаження (локально або глобально).

Втрата стійкості виникає у загальному випадку, коли у елементі конструкції виникають напруження, що перевищують допустимі. Необхідно взяти до уваги відносно низький модуль пружності. HDPE має модуль пружності приблизно 680–750 (при згинанні), 610–1600 (при розтягуванні) МПа, що в десятки разів нижче, ніж у сталі, що суттєво знижується у разі підвищення температури конструкції та призводить до зниження рівня критичних навантажень.

При цьому, для панелей з HDPE характерні:

– локальна втрата стійкості – випучування окремих ділянок;

– загальна втрата стійкості – вигин усієї панелі;

– хвильова деформація – утворення гофрованих хвиль;

– складкоутворення – при великих деформаціях.

У якості наслідків втрати стійкості можливо виокремити:

– втрату несучої здатності. Пластина перестає приймати розрахункове навантаження;

– збільшення напружень. Після випучування різко зростають вигин і концентрація напружень. Це може призвести до тріщин або розриву;

– порушення герметичності;

– прискорення повзучості. Після втрати стійкості деформація починає швидко наростати.

– втомне руйнування. При циклічному навантаженні виникають тріщини.

Доцільно розглянути механізм короткочасної втрати стійкості, оскільки більшість експлуатаційних навантажень виникають саме у цьому діапазоні.

Короткочасна втрата стійкості пластин з HDPE – це тимчасове випучування або деформація пластини під дією навантаження, яке зникає після зняття навантаження або його зменшення через їх низький модуль пружності і високу повзучість.

Механізм короткочасної втрати стійкості відбувається за наступними стадіями:

1. пружна деформація – пластина згинається без зміни структури;

2. критичний стан – виникає випучування;

3. розвантаження конструкції – пластина повертається до початкової форми (повністю або частково).

Наслідки короткочасної втрати стійкості:

1. локальні деформації, при яких виникають випучування та хвилеподібна форма поверхні. Після зняття навантаження частина деформації може зникнути;

2. залишкові деформації. Через в'язкопружність HDPE можлива поява невеликої залишкової кривизни та локальних прогинів;

3. прискорення повзучості матеріалу. Навіть короткочасна втрата стійкості може спричинити перерозподіл напруження та прискорення повзучої деформації;

4. зниження жорсткості конструкції. Після кількох циклів можливе зменшення модуля жорсткості та зростання прогинів;

5. концентрація напружень. У зоні випучування виникають підвищені напруження, що можуть призвести до мікротріщин і локального руйнування.

Короткочасна втрата стійкості не є небезпечною і вважається допустимою, якщо деформація повністю зникає після розвантаження, відсутні залишкові прогини, не відбувається руйнування структури матеріалу.

В інтересах дослідження мають значення спроможності матеріалу щодо відновлення міцності після втрати стійкості.

Повне відновлення можливе не завжди, тому що HDPE може мати залишкову деформацію. Термічне відновлення під час нагрівання до 80–110 °C може частково зняти деформації. Після втрати стійкості матеріал може продовжувати нести навантаження, але деформації швидко зростають через повзучість.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

1. Особливості зовнішніх навантажень

Зовнішні навантаження, що викликають загальний позовжний вигин малого судна для конструкцій з традиційних матеріалів, прийнято вважати незначними. Винятки з'являються тільки для швидкісних малих суден та визначаються динамічними ефектами, викликаними ударними навантаженнями при русі з великою швидкістю при зустрічному хвилюванні. Характер цих навантажень – короточасний вплив.

Вплив їх на міцність корпусних конструкцій залежить від співвідношення основних розмірів судна. При великому відношенні довжини судна до його ширини питання забезпечення загальної позовжної міцності можуть бути домінуючими.

Окремим питанням забезпечення загальної позовжної міцності малого судна є його суднопідйом на двох стропах, що забезпечується або стропами в обхват у носовій та кормовій частині, або із застосуванням штатних суднопідйомних римів. У цьому випадку загальні позовжні навантаження залежать від стану навантаження судна і точок кріплення стропів. Характер цих навантажень – короточасний вплив.

Крім того, загальні позовжні навантаження тривалого впливу можуть виникати при міжсезонному зберіганні судна на березі в кільблоках. Некоректне розташування опорних конструкцій може призвести до незворотних деформацій корпусних конструкцій.

Особливий випадок розрахунку загальної позовжної міцності пов'язаний із необхідністю розташування на судні локальних об'єктів досить великої маси (10–30% водотоннажності). В цьому випадку, можливо, доведеться здійснювати суперпозицію напружень у статичному стані та при розгляді динамічних впливів.

За першим основним випадком виникнення загальних позовжних навантажень необхідний коректний контроль у процесі проектування судна залежно від умов експлуатації. Другий і третій випадок забезпечуються простими інженерними рішеннями з урахуванням особливостей матеріалу конструкцій. Четвертий випадок пов'язаний із додатковими перевірочними рішеннями, пов'язаними з коректним визначенням вертикальних прискорень в розрахункових умовах експлуатації.

2. Особливості впливу довкілля (температурні впливи на механічні характеристики матеріалу)

Міцність HDPE значно залежить від температури навколишнього середовища, оскільки цей матеріал є термопластом, і його механічні властивості чутливі до нагрівання та охолодження.

При низьких температурах (нижче 0 °C) матеріал стає жорсткішим і крихким, ударна в'язкість різко падає через зниження рухливості молекулярних ланцюгів, що призводить до втрати здатності пластично деформуватися. Наприклад, при –50 °C HDPE може тріснути під час удару, хоча за +20 °C він витримав би таке ж навантаження без пошкоджень. Хоча, при цьому, міцність на розтяг трохи зростає (приблизно на 10–15%), ударна міцність та відносне подовження при розриві різко падають.

Оптимальний діапазон експлуатації матеріалу знаходиться у діапазоні температур 20–25 °C. При цьому, механічні характеристики становлять:

- міцність на розтяг: 20–37 МПа (залежно від марки).
- модуль пружності: 700–1400 МПа.
- ударна в'язкість: висока.

Матеріал зберігає баланс між жорсткістю та пластичністю. При підвищених температурах (40–80 °C) міцність та жорсткість знижуються.

При 60 °C міцність на розтяг може знизитися до 40% від номіналу при 23 °C.

Повзучість (довготривала деформація під навантаженням) різко зростає у зв'язку зі збільшенням рухливості макромолекул та ослабленням міжмолекулярних зв'язків.

Залежність механічних властивостей матеріалу від температури показано на рис. 1, 2.

3. Необхідність коригування стандартної схеми розрахунку загальної позовжної міцності даного матеріалу

Розрахунок загальної позовжної міцності для малих суден може бути необхідним в умовах, описаних у розділі 2. При цьому різні випадки дії навантажень у позовжній вертикальній площині можуть істотно відрізнятися за критеріями міцності (насамперед за величиною розрахункових напружень, що допускаються). Розглянемо основні розрахункові випадки:

1) Динамічний вплив загальних навантажень у процесі руху швидкісного судна на зустрічному хвилюванні (основний випадок, що розглядається Реестром). У цьому випадку зовнішні знакозмінні навантаження є короточасними у відповідних межах.

Величини допустимих напружень згідно з табл. 2.

У цьому випадку напруження, що досягають межі плинності, не є критичними. Звісно, необхідно мати належний коефіцієнт запасу міцності.

У той же час, конструкції корпусу можуть перебувати в різних температурних умовах. Наприклад, у літніх умовах у зонах апвелінгу температура палубних конструкцій може досягати 60 °C, температура днищових та бортових конструкцій може бути близько 12 °C. Значний градієнт (48 °C) здатний суттєво змінити характеристики еквівалентного бруса і, відповідно, розподіл нормальних напружень у позовжних в'язях корпусу.

Таблиця 2. Допустиме напруження

Матеріал	HDPE
σ_y, MPa	25
σ_d, MPa	22,5

Це відбувається за рахунок зміни міцності поздовжніх в'язей на тлі температурного режиму. У цьому випадку необхідно враховувати зміну характеристик еквівалентного бруса з урахуванням редукування поздовжніх в'язей з урахуванням коригування міцності і модуля пружності в'язей залежно від температурного режиму.

2) Варіант підйому на двох стропах також полягає у короткочасному випадку навантаження.

Температурний градієнт у цьому випадку може бути меншим, але можливо, його теж необхідно враховувати. Якщо суднопідйом відбувається при нульових або негативних температурах слід враховувати зменшення пружності матеріалу в даних умовах.

3) Варіант зберігання судна на березі в кільблках накладає, крім можливих впливів температурних градієнтів, врахування тривалості процесу зберігання і, відповідно, обмеження величини напруження, що допускається, залежно від терміну зберігання.

3.1. Загальна схема коригування параметрів еквівалентного бруса стосовно особливостей використовуваного матеріалу та результати коригування

Якщо розглянути перший варіант руху судна в літній період в умовах апвелінгу, можна відзначити,

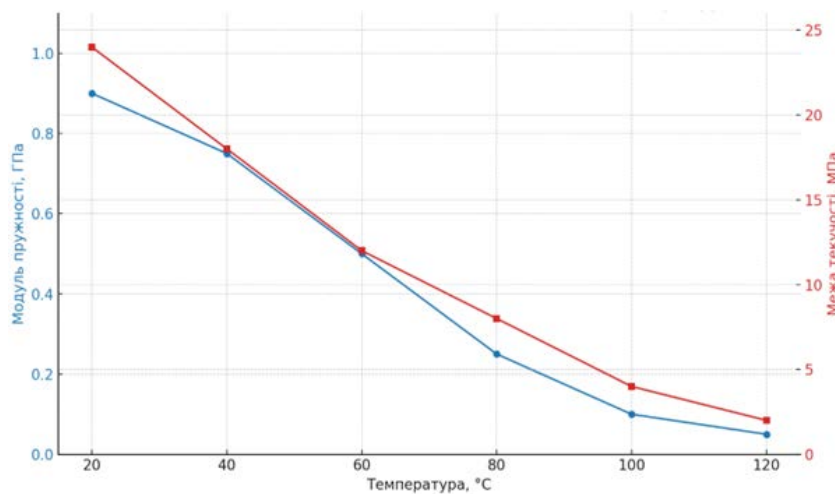


Рис. 1. Залежність механічних властивостей матеріалу від температури

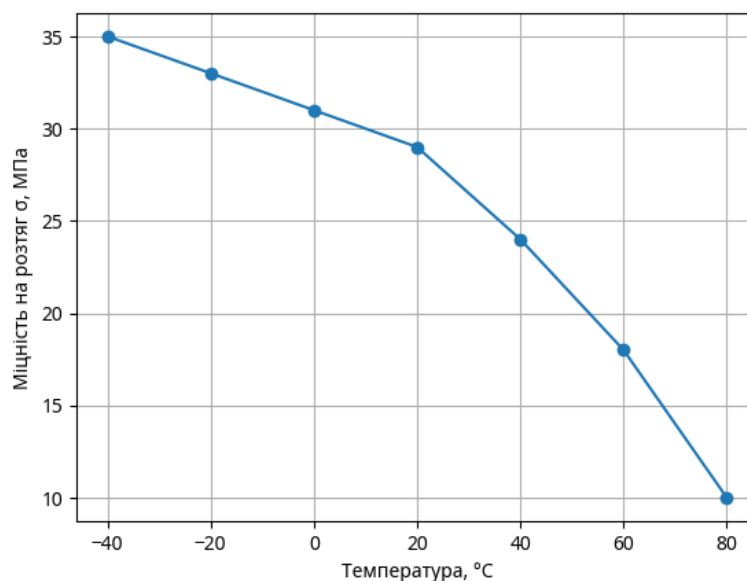


Рис. 2. Залежність міцності на розтяг HDPE від температури

що різні райони корпусних конструкцій знаходяться в різних температурних умовах. Температура води може бути в діапазоні 10–13 градусів. Палуба у разі під впливом сонячного випромінювання нагрівається до температури 50–60 °С.

Це дані щодо Гвінейської затоки. У Чорному морі в північно-західній частині апвелінг відбувається регулярно. Температурний градієнт між днищовими та палубними конструкціями близько 40 градусів. Особливості аналізованого матеріалу корпусних конструкцій полягають у кольорі матеріалу. Чорні конструкції нагріваються значно більше. Різницю властивостей міцності матеріалів різних перекриттів судна необхідно дослідити. Характеристики головного центрального моменту інерції, положення нейтральної осі та, відповідно, моментів опору палуби та днища можуть залежати від температурних режимів експлуатації.

Для дослідження впливу температурних ефектів прийнято мале судно з гідродинамічною схемою – тримаран (рис. 3) з наступними характеристиками, які представлені таблиці 3:



Рис. 3. Судно, що досліджується

Поздовжні конструкції в районі мідель-шпангоута та їх геометричні характеристики перерізу представлені на рис. 4, 5.

У випадку, що розглядається, корпусні конструкції судна можна розділити на 3 групи залежно від температурного режиму (див. рис. 6-7). Перша група – палубні конструкції, що нагріваються під впливом сонячної радіації до температури близько 60 °С. Друга група – конструкції бортів, що періодично замиваються забортною водою (передбачається, що в цьому випадку температура конструкцій буде близько 20 °С). Третя група – конструкції, що безпосередньо контактують із забортною водою – 12 °С.

Таблиця 3. Характеристики малого судна з гідродинамічною схемою – тримаран

Вантажна водотоннажність судна при осаді за літньою вантажною ватерлінією (маса судна в повному вантажі), кг:	$m_{LDC} = 5.277 \times 10^3$
Занурення по КВЛ корпусом, м:	$d = 0.575$
Висота борту на міделі, м	$D = 1.296$
Ширина, м:	$B = 3.472$
Найбільша ширина судна, м:	$B_H = 3.511$
Довжина найбільша, м:	$L_H = 14.000$
Довжина по КВЛ, м:	$L_{WL} = 13.968$

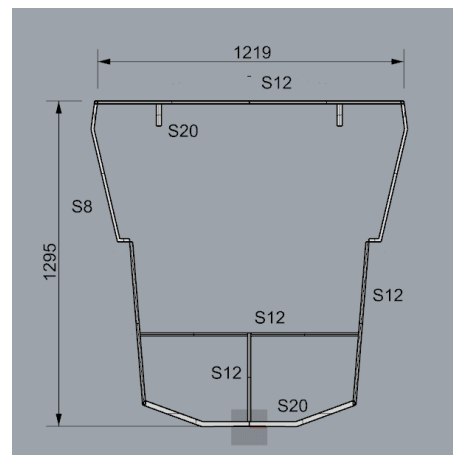


Рис. 4. Поздовжні конструкції в районі мідель-шпангоута

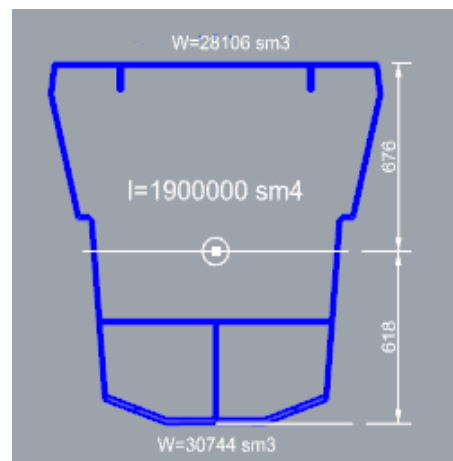


Рис. 5. Геометричні характеристики перерізу

Редукування в'язей проводиться комбінованим методом з урахуванням зміни міцності та пружності матеріалу конструкцій.

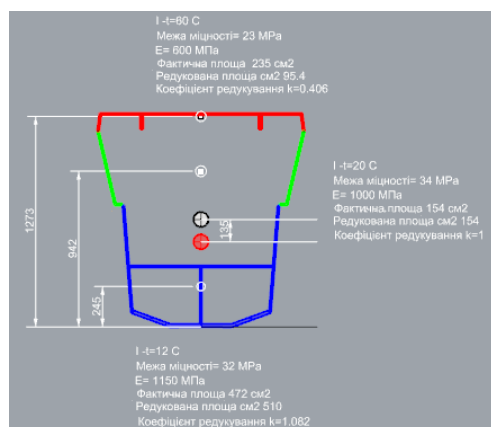


Рис. 6. Результати редукування площ поперечного перерізу поздовжніх конструкцій за параметрами температурного режиму

В результаті одержуємо наведений переріз з наступними характеристиками (рис. 7).

При порівнянні фактичних геометричних характеристик перерізу з наведеними можна відзначити:

- 1) ефективний момент інерції площі поперечного перерізу зменшується на 36% щодо базової геометрії;
- 2) зміщення нейтральної осі перерізу відбувається у бік днища і становить 10.6% висоти борту;
- 3) ефективний момент опору палуби зменшується на 44%;
- 4) ефективний момент опору днища зменшується на 23,6%.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз результатів дослідження показує, що при розрахунках загальної поздовжньої міцності малих суден з конструкціями із HDPE неможливо отримати коректні результати без урахування екстремальних температурних режимів експлуатації конструкцій.

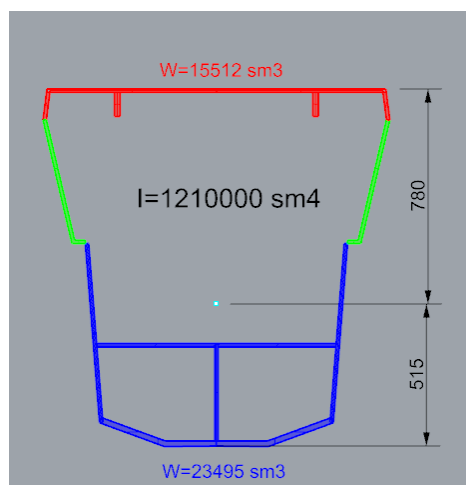


Рис. 7. Наведений переріз

2. У разі розгляду варіанта навантажень при підйомі на стропах результати, що розглядаються, теж справедливі з урахуванням відносної короткочасності докладання навантажень.

3. Випадок зберігання судна на кільблоках залежить від умов зберігання та з урахуванням тривалості дії навантажень підлягає окремому розгляду.

4. Необхідний окремий підхід до нормування загальної поздовжньої міцності малих суден з конструкціями з матеріалу, що розглядається.

5. Загальний підхід до нормування загальної поздовжньої міцності повинен містити дослідження стійкості панелей перекриттів. Це здатне внести додаткові корективи до загальної схеми розрахунку.

6. Є необхідність в окремій схемі нормування загальної поздовжньої міцності суден з конструкціями з матеріалу, що розглядається.

REFERENCES

- [1] Hrabenko, A.A. & Kuznetsov, A.I. (2021). Osoblyvosti zastosuvannya polietylenу nyzkoho tysku v yakosti materialu korpusnykh konstruksii malykh suden [Application features of low-pressure polyethylene as a material of hull structures of small vessels]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannya imeni admiralа Makarova*, vol. 2 (485), pp. 3–7. [https://doi.org/10.15589/znp2021.2\(485\).1](https://doi.org/10.15589/znp2021.2(485).1) [in Ukrainian].
- [2] Türk Loydu. (2002). Tentative rules for polyethylene crafts. 9 p. [in English].
- [3] Ward, I.M. & Sweeney, J. (2013). *Mechanical Properties of Solid Polymers*. (3rd ed.). Chichester: John Wiley & Sons. 475 p.
- [4] LyondellBasell (LYB). Tekhnichni spetsyfikatsii poliolefinovykh materialiv kompanii LyondellBasell. <https://www.lyondellbasell.com>.
- [5] Borealis. Technical specifications of Borealis polymer materials. <https://www.borealisgroup.com>.
- [6] Brinson, H.F. & Brinson, L.C. (2015). *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity*. New York: Springer. 489 p.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Грабенко, А.А., & Кузнецов, А.І. (2021). Особливості застосування поліетилену низького тиску в якості матеріалу корпусних конструкцій малих суден. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*, № 2 (485). С. 3–7. [https://doi.org/10.15589/znp2021.2\(485\).1](https://doi.org/10.15589/znp2021.2(485).1)
- [2] Türk Loydu. (2002). Tentative rules for polyethylene crafts. 9 p.
- [3] Ward, I.M. & Sweeney, J. (2013). *Mechanical Properties of Solid Polymers*. (3rd ed.). Chichester: John Wiley & Sons. 475 p.
- [4] Компанія LyondellBasell (LYB). Технічні специфікації поліолефінових матеріалів компанії LyondellBasell. <https://www.lyondellbasell.com>. (дата звернення: 21.01.2026).

- [5] Компанія Borealis. Технічні специфікації полімерних матеріалів компанії Borealis. <https://www.borealisgroup.com> (дата звернення: 19.01.2026).
- [6] Brinson, H.F. & Brinson, L.C. (2015). Polymer Engineering Science and Viscoelasticity. New York: Springer. 489 p.

© Лисицький І. В., Кузнецов А. І., Щедролосєв О. В., Коновалова Г. В.

Дата першого надходження статті до видання: 17.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)