

**КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ  
З ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ**

*Молчанов А.О., Васильченко Г.Ю.,  
ВНЗ «Херсонський державний морський інститут»*

*В статті розглядаються проблеми формування змісту лабораторного практикуму з дисципліни «Опір матеріалів» з урахуванням вимог до рівня підготовки спеціалістів морського транспорту. Основним завданням роботи є визначення необхідного і достатнього рівня викладання однієї з дисциплін технічної механіки, яка повинна бути обов'язковою складовою загально інженерної підготовки фахівців інженерного напрямку. Обґрунтовується перелік лабораторних робіт, який забезпечує достатній рівень знань з цієї дисципліни.*

*Ключові слова: лабораторний практикум, оптимізація змісту, структура, концептуальний підхід, рівняння міцності, графіки навантаження.*

**Вступ.** У навчальному посібнику авторів [1] була дана загальна характеристика лабораторних робіт, де наводиться їх обов'язкова тематика, її доцільність, а також взаємний зв'язок між окремими темами.

Метою даної роботи є розгляд питання оптимізації змісту та обґрунтування теоретичних засад практикуму-мінімуму з наближенням його до методичних вказівок з лабораторно-практичних робіт.

Вибір тем лабораторних робіт та практичних занять найчастіше визначається технічними можливостями навчального закладу та пристрастями лектора. Тут слід врахувати, що структура і тематика лекційних курсів всіх навчальних дисциплін технічного циклу цілком визначилась вже наприкінці 19-го сторіччя. Цьому передувало становлення та розвиток окремих розділів та дискусія стосовно доцільності і змісту при їх включенні в склад навчальних дисциплін.

Лабораторний практикум, як допоміжний розділ навчальної дисципліни, як би витікав з лекційного курсу і будувався у взаємозв'язку з ним. Що стосується взаємного зв'язку та взаємної обумовленості структури і тематики в середині лабораторного практикуму, то про них, як нам здається, особливо не замислювалися. При цьому втрачалась доцільність і послідовність реалізації окремих тем дослідницьких розробок. При такому підході, з поля зору лектора, могли випадати важливі експериментальні теми і залишатись другорядні питання. Тому тематика лабораторного практикуму не може формуватись спонтанно, без чіткого зв'язку з лекційним курсом, і відхилятися від логіки його структури.

Концептуальний підхід до лабораторного практикуму переслідує таку мету: показати (проілюструвати) системність вибору тем (питань), закономірність, обґрунтованість їх суті та послідовності. Такий підхід дозволяє зробити дисципліну доступною для студентів.

Таким чином ця робота є продовженням і розвитком ідеї раніше опублікованого лекційного курсу, що забезпечує його доступність і поєднання теоретичного та практичного матеріалу

**Постановка проблеми.** Основна задача роботи була сформульована у вступі і має на увазі концептуальний підхід до формулювання тематики лабораторного практикуму.

Перш за все відмітимо, що основними задачами курсу «Опір матеріалів» є п'ять завдань: чотири пов'язані з рішенням проектувального і перевірконого розрахунків, а одне – з експериментальними дослідженнями по встановленню окремих коефіцієнтів, без яких неможливе вирішення основних теоретичних (розрахункових) залежностей.

Пристаючи до розгляду задач експериментальних досліджень зазначимо, що в цілому наукова та навчальна дисципліна «Опір матеріалів» будується на складанні та розв'язанні рівняння міцності:

$$\sigma \leq [\sigma] \text{ або } \tau \leq [\tau], \quad (1)$$

де  $\sigma$  та  $\tau$  – фактичне (розрахункове) значення напруги при нормальному і дотичному прикладанні навантаження відповідно;  $[\sigma]$  та  $[\tau]$  – допустиме значення напруги, які потребують експериментального вирішення, зокрема:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{адмі}}}{n} \text{ або } [\tau] = \frac{\tau_{\text{адмі}}}{n}, \quad (2)$$

де  $\sigma_{\text{адмі}}$  і  $\tau_{\text{адмі}}$  – гранична напруга відповідно нормальна і дотична, що залежать від характеру напруженого стану і природи матеріалу;  $n$  – коефіцієнт запасу міцності.

Саме тут з установами граничної напруги і визначення припустимої напруги (при розтягуванні стрижня під дією нормального навантаження) слід розпочинати лабораторний практикум з «Опору матеріалів». Це логічно обґрунтована вихідна крапка експериментальних досліджень.

### **Випробування на розтяг.**

#### ***Напруга та переміщення. Закон Гука.***

#### *Переміщення в стрижні.*

Стрижень (рисунок 1, а) під дією двох сил  $P$ , рівних за величиною і протилежно направлених за його поздовжньою віссю, зазнає деформацію розтягу, яка виявляється в зміні довжини і розмірів попереччя стрижня.

Його первинна довжина  $\ell$  збільшується на величину  $\Delta\ell$  – на так зване **абсолютне подовження**, і стає рівною  $\ell_1$ . Таким чином абсолютне подовження визначається з виразу:

$$\Delta\ell = \ell_1 - \ell. \quad (3)$$

Абсолютне подовження стрижня при заданому значенні деформуючої сили зростає із збільшенням його первинної довжини. У зв'язку з цим деформація при розтягуванні більш повно характеризується відносною величиною  $\varepsilon = \Delta\ell / \ell$ , яку називають відносним подовженням:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell} = \frac{\ell_1 - \ell}{\ell}. \quad (4)$$

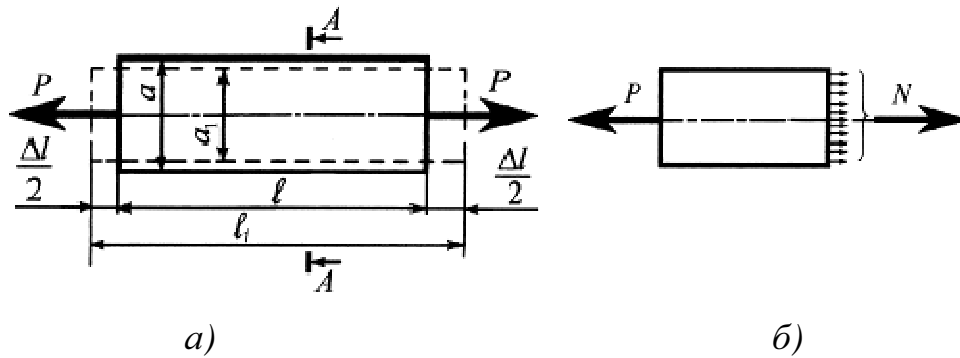


Рисунок 1 – Розтяг стрижня:

а) сила  $P$  – зовнішній обтяг для стрижня; б) ліва частина стрижня після відкинutoї правої повинна залишатися в стані рівноваги

При напрямі зовнішніх сил, протилежному вказаному на рисунку 1.1, стрижень зазнає **деформацію стиснення**. В цьому випадку величину  $\Delta\ell$  називають **абсолютним укороченням**, оскільки при стисненні довжина стрижня зменшується. Одночасно з поздовжньою деформацією стрижень зазнає поперечну деформацію. При розтягуванні поперечні розміри зменшуються, при стисненні збільшуються. **Відносна поперечна** деформація може бути визначена з виразу:

$$\varepsilon_1 = \frac{a_1 - a}{a}. \quad (5)$$

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right|. \quad (6)$$

Відношення (6) називають **коефіцієнтом Пуассона**. Цей коефіцієнт визначають експериментальним шляхом. Для сталі  $\mu = 0,25 \dots 0,33$ ; для міді  $\mu = 0,31 \dots 0,34$ ; для бронзи  $\mu = 0,32 \dots 0,35$ ; для чавуну  $\mu = 0,23 \dots 0,27$ ; для алюмінію  $\mu = 0,32 \dots 0,36$ .

#### **Напруга в стрижні.**

Відповідно до гіпотези плоских перерізів вважають, що для однорідного стрижня всі поперечні перерізи при деформації переміщуються паралельно і, отже, в них діє тільки паралельна напруга. Переріжемо стрижень площиною А–А (рисунок 1, а), перпендикулярно до осі стрижня. З умови рівноваги частини стрижня (рисунок 1, б), беручи до уваги, що рівнодіюча внутрішніх сил пружності

$$N = F \cdot \sigma,$$

де  $F$  – площа поперечного перерізу, маємо:

$$F \cdot \sigma - P = 0.$$

Звідси напруга в поперечному перерізі стрижня при розтягуванні або стисненні визначається з виразу:

$$\sigma = \frac{P}{F} \quad (7)$$

Експериментальним шляхом встановлено, що в межах подовжень для пластичних матеріалів має місце пряма пропорційна залежність між напругою і деформаціями. Ця залежність носить назву «Закон Гука»:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (8)$$

Коефіцієнт пропорційності  $E$  називається модулем поздовжньої пружності або модулем пружності першого роду (модулем Юнга). Він має розмірність напруги – Н/см<sup>2</sup> або Н/мм<sup>2</sup> і характеризує здібності матеріалу чинити опір пружній деформації при розтягуванні і стисненні. Коефіцієнт пропорційності  $E$  визначають експериментальним шляхом: для сталі  $E = (2,0... 2,15) \cdot 10^6$  Н/см<sup>2</sup>; для алюмінію –  $(0,7... 0,8) \cdot 10^6$  Н/см<sup>2</sup>; для бронзи  $1,15 \cdot 10^6$  Н/см<sup>2</sup>.

Підставимо у вирази значення величин  $\varepsilon$  і  $\sigma$ , отримаємо:

$$\Delta \ell = \frac{P \cdot \ell}{E \cdot F}, \quad (9)$$

тобто абсолютне подовження (укорочення) стрижня при розтягуванні (стисненні) прямо пропорційне до розтягуючої (стискуючої) сили та довжини стрижня і обернено пропорційне до модуля пружності та до площі поперечного перерізу. Добуток  $E \cdot F$  називають жорсткістю поперечного перерізу при розтягуванні (стисненні).

#### **Випробування на розтяг. Діаграма розтягу**

Випробування проводять з метою визначення граничного значення напруги і встановлення механічних характеристик матеріалу. Дана лабораторна робота вважається базовою і основною в лабораторному практикумі.

Випробування на розтяг здійснюють статичною навантагою випробувальних зразків на спеціальних машинах (стендах). Для цього застосовують стандартний циліндричний зразок (рисунок 2, а). Довжина центрального циліндра перевищує його діаметр приблизно в 15 разів. На циліндрі рисками виділяють ділянку для вимірювання деформації, довжина якої  $\ell_0 = 10d_0$ , де  $d_0$  – діаметр стрижня до розтягу. Іноді для випробувань застосовують плоскі або малі циліндричні зразки, у яких  $\ell_0 = 5d_0$ .

Під час розтягу зразка в процесі випробувань реєструють навантаження на зразок і його подовження  $\Delta \ell$ . За цими даними будують діаграму розтягу (рисунок 3, а), що має вигляд кривої  $P = f(\Delta \ell)$ . Більшість сучасних випробувальних машин мають пристрій для автоматичного викреслювання діаграми розтягу.

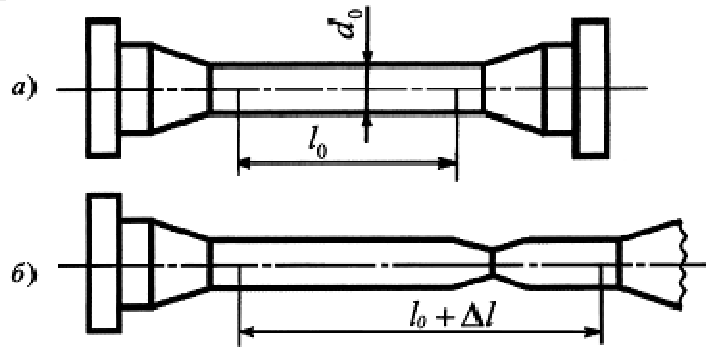


Рисунок 2 – Випробування на розтяг: а – випробувальний зразок (ВЗ); б – випробувальний зразок під час випробування на розрив при його руйнуванні.

Кількісна оцінка фізичних властивостей матеріалу може бути зроблена за допомогою діаграми розтягу в системі координат  $(\sigma, \varepsilon)$ .

Тут напруга, що відкладається по вертикальній осі, має вираз різновиду:

$$\sigma = \frac{P}{F_0},$$

де  $F_0$  – площа поперечного перерізу зразка до випробування.

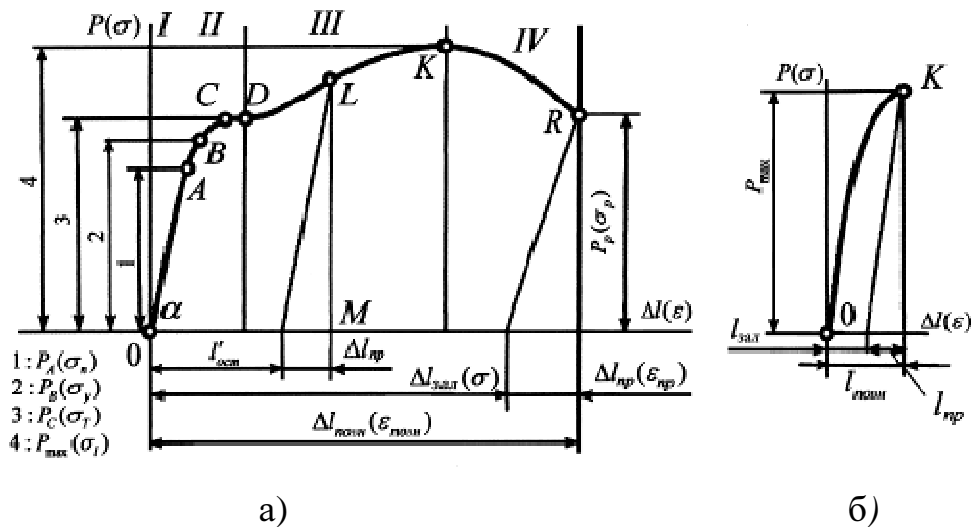


Рисунок 3 – Діаграма розтягу зразка: а) з маловуглецевої сталі; б) з крихких матеріалів

Відносне подовження зразка, що відкладається по горизонтальній осі, має вираз різновиду:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0},$$

де  $l_0$  – довжина розрахункової ділянки зразка до випробування.

Оскільки величини  $F_0$  і  $l_0$  постійні, то діаграма  $\sigma = f(\varepsilon)$  має той же вигляд, що і діаграма  $P = f(\Delta l)$ , і відрізняється від неї тільки масштабами.

Діаграма  $\sigma = f(\varepsilon)$  характеризує властивості випробовуваного матеріалу і носить назву умовної діаграми розтягу.

Діаграма розтягу зразка з маловуглецевої сталі (рисунок 3, а) характеризується наступними чотирма характерними ділянками.

**Ділянка I** відповідає пружним деформаціям матеріалу зразка. На цій ділянці справедливий закон Гука і величина деформації прямо пропорційна до розтягуючого зусилля (пряма OA).

**Ділянка II** починається після точки A, коли діаграма стає нелінійною (криволінійною). Проте до точки B деформації залишаються пружними, тобто при розвантаженні зразок відновлює свою первинну форму і розміри. При подальшому збільшенні навантаги за точкою B з'являються непружні деформації. У точці C починається процес деформації деталі без збільшення зовнішньої навантаги. Цей процес називається процесом текучості матеріалу. У зоні текучості у сталевих зразках істотно змінюються електропровідність і магнітні властивості.

Поверхня полірованого зразка покривається лініями, похилими до його осі (лінії Чернова).

**Ділянка III** (DK) характерна збільшенням навантаги, при якій відбувається подальша деформація зразка. Ця ділянка називається зоною зміцнення. Закінчується ділянка при досягненні максимальної навантаги, що сприймається зразком.

**Ділянка IV** починається в точці K і закінчується руйнуванням зразка в точці R. Ця ділянка носить назву зони руйнування зразка. Деформація зразка на цій ділянці характерна утворенням шийки і подовженням зразка за рахунок потоншення шийки (див. рисунок 2, б).

### **Механічні характеристики матеріалу.**

#### **Теоретичні передумови.**

Працездатність конструкційних матеріалів при різних видах навантаження визначається величинами, що називають механічними характеристиками. Механічні характеристики встановлюють межу безпечної експлуатації елементів конструкцій при статичному і динамічному (циклічному й ударному) обтягуванні. До механічних характеристик відносять межу напруги, твердість, питому в'язкість.

Величини механічних характеристик можуть бути отримані в лабораторних умовах доведенням зразків до руйнування або надмірної деформації. Найбільш поширені випробування на розтягування і стиснення, оскільки вони відносно прості і дають достовірні результати.

Всі конструкційні матеріали можна умовно розділити на крихкі й пластичні. До дуже пластичних матеріалів відносять маловуглецеві сталі, алюміній, мідь і деякі інші. Ці матеріали володіють здатністю деформуватися в широких межах без руйнування. Прикладами крихких матеріалів можуть служити чавун, високовуглецеві сорти сталі, металокерамічні матеріали, скло. Крихкі матеріали руйнуються без помітної попередньої деформації. Проміжне положення займають металоластики, до яких можуть бути віднесені багато з легованих сталей, дюралюміній, бронза.

**Основні характеристики матеріалу згідно до діаграми розтягу.**

Відповідно до діаграми розтягу (див. рисунок 3, а) вводять наступні основні характеристики матеріалу:

1. Ділянка  $OA$  – зона пропорційності (на діаграмі – пряма лінія), закінчується точкою  $A$ , що відповідає межі пропорційності. Відношення розтягуючого зусилля в точці  $A$  до первинної площі поперечного перерізу стрижня:

$$\sigma_n = P_A / F_1, \quad (10)$$

називають межею пропорційності матеріалу, де  $\sigma_n$  – найбільша напруга межі пропорційності. До точки межі пропорційності зберігається сила закону Гука.

Тобто межею пропорційності матеріалу називають найбільшу напругу, до якої матеріал підкоряється закону Гуку.

2. Точка  $B$  на діаграмі розтягу відповідає межі пружності матеріалу. Відношення розтягуючого зусилля в точці  $B$  до первинної площі поперечного перетину

$$\sigma_{nd} = \frac{P_{\hat{A}}}{F_{\hat{f}}}, \quad (11)$$

називають межею пружності матеріалу.

Межею пружності матеріалу називається максимальна напруга, до якої в матеріалі відсутні залишкові деформації.

Межа пружності – це така напруга, при якій величина відносної залишкової деформації не перевищує 0,005%. На практиці між межею пропорційності і межею пружності відмінності не роблять у зв'язку з малою величиною розбіжності їх значень.

3. Ділянка  $CD$  – зона текучості. Відношення розтягуючого зусилля в точці  $C$  до первинної площі поперечного перерізу стрижня

$$\sigma_{\hat{d}} = \frac{P_{\hat{N}}}{F_{\hat{f}}},$$

називають межею текучості. Межею текучості називається напруга, при якій деформація росте без збільшення навантаги.

4. Відношення найбільшої навантаги до первинної площі поперечного перерізу стрижня

$$\sigma_{\hat{a}} = \frac{P_{\max}}{F_{\hat{f}}}, \quad (12)$$

називають межею міцності або тимчасовим опором. Межу міцності при розтягу позначають  $\sigma_{\hat{ad}}$ , при стисненні –  $\sigma_{\hat{an}}$ . Межа міцності відповідає максимальній напрузі, що виникає в зразку до його руйнування.

Діаграма розтягу крихких матеріалів наведена на рисунку 3, б, де відхилення від закону Гука починається при малих значеннях деформуючої

сили. Ця діаграма не має площини текучості, зразки руйнуються при дуже малій залишковій деформації без утворення шийки.

Наведені в теоретичному курсі приклади розрахунків (на розтягування-стиснення, гнуття, в т.ч. поздовжнє) зводяться до визначення діючих моментів, навантажень і деформацій балок і стрижнів, які служать для визначення допускних геометричних (розмірних) параметрів (діаметр стрижня круглої форми, площі і розмірів поперечного перерізу балки, прогину стрижня або балки і тому подібне), тобто параметрів, необхідних для розв'язання рівняння міцності (стійкості) як основи основ і суті дисципліни «Опір матеріалів», як було відмічено ще у вступі.

Що стосується теоретичної основи «Опору матеріалів», то вона включає не такий вже великий перелік фундаментальних залежностей, а саме: Закон Гука, принцип Сен-Венана, формули Журавського і Ейлера – ось, мабуть, і все.

Таким чином, нічого того, що б утруднювало засвоєння навчальної дисципліни «Опір матеріалів», немає, якщо її (вільно або мимоволі) не ускладнювати, в т.ч. завданнями другорядної значущості. До речі, виграшними в цьому відношенні є навчальні дисципліни з обмеженим обсягом, в яких немає місця для «ліричних подробиць» у вигляді спеціальних розділів (складне навантаження, напружений стан при ударних навантаженнях, розрахунок оболонок і так далі).

**Загальні підсумки.** Закон Гука справедливий при нарузі, що не виходить за межі пропорційності, тобто при лінійності залежності:

$$\sigma = f(\varepsilon),$$

Аналізуючи результати випробувань на розтяг, слід відмітити, що визначення  $[\sigma]$  по  $\sigma$  меж. цілком коректне. Однак тут слід мати на увазі, що  $\sigma$  меж. знаходиться в зоні нелінійних деформацій, а також використання коефіцієнту запасу міцності  $n$  вносить певну невизначеність. Перше і друге своєю статистичною основою впливає на точність результатів. Більш точні результати можна чекати тільки в зонах пропорційних лінійним деформаціям, тобто, коли деталь після знаття впливу навантаження приймає свою вихідну форму та розмір, тобто підкоряється закону Гука.

Саме на дослідженнях цього закону повинні ґрунтуватися всі наступні лабораторні роботи. Логіка лабораторного практикума тут наступна: дослідження діаграми розтягу встановлюють основні закономірності напруженого стану, в тому числі на основі закону Гука, а потім даний закон підтверджується для інших видів (типів) деформацій, наприклад, при розрахунках на жорсткість, кручення або вигин. Логічний зв'язок і доцільність такого підходу зрозумілі як для спеціалістів, так і для учнів.

Основні положення базової лабораторної роботи, зокрема ті, що стосуються закону Гука, перевіряють в наступних лабораторних роботах по визначенню модуля Юнга (продольної пружності) при розрахунках на жорсткість; модулю здвигу при крученні.



У символічному виді ці випадки реалізації закону Гука характеризуються рівняннями:

$$\sigma_{np} = E \times \varepsilon.$$

Для напруженого стану при крученні нас цікавить вже напруження при пружній деформації  $\sigma_{np}$ , та кут закручування  $\varphi$ , який створюється в зоні пружної деформації

$$\varphi = M_k \times l_0 / G \times J_p,$$

де  $G \times J_p$  – жорсткість;  $l_0$  – розрахункова довжина зразка;  $M_k$  – крутний момент.

Тут мається на увазі, що в першому і в другому випадку закону Гука використовується при розрахунках на жорсткість.

Тобто перші три лабораторні роботи включають базову діаграму розтягу, сконцентровані на дослідженні закону Гука.

Заключною лабораторною роботою можна вважати випробування балки на згинання з використанням тензометрії, тобто тут мають місце проміжні дані між експериментом і наступним розрахунком, приклади якого складають основний зміст наступного практичного заняття. Таким чином логічно пов'язані теми і зміст лабораторних робіт з слідуючими за ними практичними заняттями створюють системно-об'єднаний лабораторний практикум з опору матеріалів.

**Молчанов А.А., Васильченко Г.Ю. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ**

*В статье рассматриваются проблемы формирования содержания лабораторного практикума по дисциплине «Сопроотивление материалов» с учетом требований к уровню подготовки специалистов морского транспорта. Основной задачей работы является определение необходимого и достаточного уровня преподавания одной из дисциплин технической механики, которая должна быть обязательной составной общеинженерной подготовки специалистов инженерного направления. Обоснован перечень лабораторных работ, который обеспечивает достаточный уровень знаний по этой дисциплине.*

*Ключевые слова: лабораторный практикум, оптимизация содержания, структура, концептуальный подход, уравнение прочности, графики нагрузки.*

**Molchanov A.A. Vasilchenko G.U. CONCEPTUAL APPROACH TO LABORATORY WORKSHOP ON STRENGTH OF MATERIALS**

*The problems of forming the content of the laboratory workshop in «Strength of Materials» discipline considering all the requirements to the training specialists of marine transport are examined in this article. The main task of this work is to determine necessary and sufficient level of teaching one of the disciplines of technical mechanics which must be an obligatory component of general engineering training of specialists in engineering. A list of laboratory works for providing a sufficient level of knowledge in this discipline is proved.*

*Key words: laboratory workshop, optimization of content, structure, conceptual approach, equation of strength, load diagrams*