

## ТЕОРІЯ РУХУ СУДНА НА ПОВОРОТІ ПРИ БУКСИРУВАННІ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ОСТАННІХ ДОСЯГНЕНЬ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ

**Товстокорий О. М.**, к.т.н., доцент, капітан далекого плавання, завідувач кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: otovstokory@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3048-0028;

**Нагрибельний Я. А.**, доктор педагогічних наук, професор, декан факультету судноводіння, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, e-mail: yar1507@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3266-5798;

**Матейчук В. М.**, доктор філософії, доцент кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: mateichykv@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9328-0651.

*Об'єктом дослідження є процес повороту суден при буксируванні. Стаття присвячена з'ясуванню положення базових точок повороту судна при буксируванні. У буксируванні беруть участь мінімум дві одиниці: буксир і об'єкт буксирування. Положення базових точок є різними для кожного з учасників процесу буксирування. Від положення базових точок залежить траєкторія буксирного каравану. Спочатку визначаються базові точки для буксира та для об'єкта буксирування. З'ясовується, що при буксируванні під час повороту буксир можуть очікувати серйозні небезпеки: гірдінг і положення «в лецатах», які можуть призвести до перекидання буксира.*

*Порівнюючи попередні джерела щодо цього питання з'ясовується, що процес повороту при буксируванні розглядався не так, як пропонує сучасна змістовна модель повороту судна.*

*Крім визначення базових точок повороту усіх учасників буксирування виникає потреба з'ясувати, як будуть рухатись буксир, об'єкт буксирування і буксирна лінія. Це також впливає на акваторію, яку займає буксирний караван при поворотах. Що впливає на безпеку плавання. Для пояснення цього питання розглядається приклад руху системи судно-буксир + сейсмічне обладнання, розкладається на компоненти і аналізується.*

*Також розглядається аварія, яка сталась з буксиром-якорезавізником завдяки гірдінгу.*

*У висновках показується положення базових точок повороту при буксируванні і зміна їхніх позицій при різних маневрах, у тому числі і при небезпечних ситуаціях «гірдінг» і «у лецатах». Надаються рекомендації ММО щодо запобігання цих ситуацій і пропозиції, що потрібно робити, коли потрапили у положення «у лецатах».*

**Ключові слова:** буксир; об'єкт буксирування; гірдінг; положення «у лецатах»; траєкторія руху; центр обертання; полюс повороту; буксирна точка.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.114-129**

**Вступ.** Буксирування – операція, яка досить часто трапляється в морській практиці. Знання закономірностей руху суден буксирного каравану підвищує точність вирахування і нанесення на карту маршруту буксирного каравану, що в свою чергу, підвищує безпеку буксирного каравану. Крім того, при виконанні операції буксирування можуть трапитись небезпечні явища, які загрожуватимуть судну. Їх також потрібно знати, розглянути, проаналізувати і зробити висновки, як їх можна уникнути.

Буксирування – це операція, коли одне судно (буксир) тягне або штовхає інше судно або інший предмет.

Буксирування може бути аварійним або плановим.

У разі планового буксирування зазвичай використовують спеціальне судно (буксир), яке має буксирне спорядження і призначене для таких робіт. В офшорних компаніях багато буксирів, і буксирування – одна з основних операцій для них. Завдяки цьому слід говорити про заплановане буксирування.

Використовуючи новий погляд на поворот судна, змістовну модель повороту судна, потрібно використати їх для розгляду процесу буксирування. Це зможе оцінити процес буксирування з погляду врахування новітніх досягнень і, можливо, виявити якісь сторони цього процесу, які не враховувалися раніше і можуть бути небезпечними, якщо їх не взяти до уваги зараз, наприклад, явище гірдінгу.

**Постановка проблеми.** При розгляді процесу буксирування потрібно врахувати, як визначати базові точки процесу повороту при буксируванні, визначити, які небезпечні явища можуть виникнути і як їм запобігти.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Питання буксирування обговорюється давно і думки авторів на те, де знаходяться базові точки повороту як буксира, так і об'єкта буксирування розрізняються.

В [1] автори роз'яснюють основні положення буксирування без згадки про базові точки процесу буксирування.

У роботі [2] викладені загальні принципи морських буксировок, дані теоретичні і практичні основи і принципи розрахунку буксирних ліній і підбір буксирувальника, розглянуті різні схеми заведення і установки буксирної браги і буксирних пінів для буксування судів та інших плавучих об'єктів, включаючи установки, обладнання та платформи.

В операції буксирування беруть участь як мінімум два об'єкти: буксир і об'єкт буксирування. Для того щоб ця операція вдалась, потрібно, щоб буксир за допомогою свого упору гвинта міг подолати опір як об'єкта буксирування, так і свій власний.

Автори в [3] вважають, що важливо розуміти вплив полюса повороту на будь-яке судно, але особливо на буксири під час буксирування. Знання полюса повороту допомагає капітану буксира зрозуміти, як буксирована одиниця буде керуватися в різних ситуаціях. Плавуча одиниця обертається навколо точки, розташованої вздовж її довжини, яка називається полюсом повороту, і коли прикладається сила, вона повертається навколо цієї точки. Ці сили можуть бути рухами керма, буксиром, який тягне в одному напрямку, вітром або течією. Положення полюса повороту змінюватиметься залежно від швидкості, осадки, підкілевого просвіту, розміру/типу керма, конструкції буксира та форми корпусу.

Також важливо розуміти, як змінюється полюс повороту буксированої одиниці. Судно або баржа, зупинені у воді без застосування зовнішніх сил, матимуть полюс повороту, що збігається з центром плавучості, який знаходиться приблизно посередині судна. Коли судно рухається вперед, полюс повороту рухатиметься вперед. Зазвичай, він рухатиметься приблизно на 25% довжини буксированого судна до носа під час руху вперед і навпаки, якщо рухатиметься назад.

Так автори [4] вважають, що полюс повороту (ПП) буксира знаходиться в 1/3 довжини судна від форштевня під час ходу вперед і переміщується в буксирну точку (БТ – точка, в якій сила буксирного троса прикладається до буксира) тоді, коли буксир потрапляє у "irons" (рис. 1).



Рисунок 1 – Положення ПП при ходові вперед і при ситуації "in irons"[4]

Капітан Cauvier Н. у [5] вважає, що, якщо при ходові судна назад буксир, який діє на укол у кормовій частині судна пересуває ПП судна в 1/3 довжини судна від форштевня.

Капітан Butusina Р. у [6] пояснює, що, якщо судно не має ходу відносно води і буксир штовхає його в районі міделя судна, судно буде рухатись лагом. Якщо ж буксир переміститься в корму від міделя, ПП переміститься вперед і буде далеко попереду за межами судна. При подальшому русі буксиру в корму ПП буде наближатися до судна, перейде в межі корпусу і буде рухатися далі поки буксир не досягне корми. Якщо ж буксири з різних боків з однією силою і на однакових відстанях від міделя будуть штовхати судно. Воно буде обертатися навколо центра бокового опору.

Автори в [7] та [8] розглядають варіант руху судна лагом під дією двох буксирів. Вони вважають, що полюс повороту переміщується всередині корпусу судна.

Автори в [9, 10, 11] висловлюють сумнів у правильному розгляді положення полюса повороту, а в [10] висловлює точку зору, що положення полюса повороту при дії буксира враховується неправильно.

Автори в [12], [13] пропонують нову схему повороту судна. Згідно з цією схемою при виконанні повороту потрібно знати положення таких точок:

– Центр обертання (ЦО), точка, в якій момент інерції судна є найменшим і від якої відраховуються всі бокові сили і моменти цих сил, а також плече ПП. При прикладанні бокової сили в ЦО обертального руху не відбувається. Відбувається лише поступальний рух у бік дії бокової сили. ЦО зміщується назустріч потокові води і на відстань пропорційну поздовжній швидкості;

– Полюс повороту (ПП) – точка, навколо якої повертається судно, дрейф дорівнює 0 і бокова швидкість дорівнює 0.

Для керування кутовим рухом на більшості суден використовується одне стерно. Відхилення стерна, крім створення керуючого моменту, призводить також і до появи бокової сили. Бокова сила і керуючий момент викликають появу бокового і кутового руху одночасно. [1].

На рисунку 2 наведено графічне уявлення полюса повороту судна.

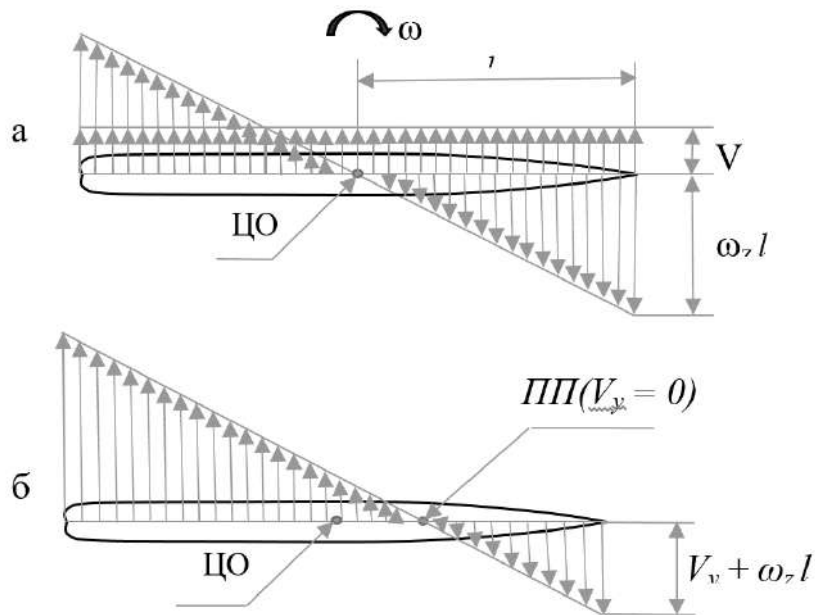


Рисунок 2 – Графічне уявлення про полюс повороту:

- а) епюри швидкостей бокового і кутового руху навколо ЦО
- б) сума епюр швидкостей бокового і кутового руху навколо ЦО

Як видно із рис. 2.б), нульове значення сумарної бокової швидкості виявилось зміщеним на відстань  $R$  від центру обертання. Це положення називається полюсом повороту. Два рухи, наведені на рис. 2.а) та сумарний рух, наведений на рис. 2.б), являються

еквівалентними, а значить, боковий і кутовий рух навколо ЦО можуть бути замінені одним кутовим рухом навколо ПП. Положення полюса повороту  $R$  можна знайти у аналітичному вигляді, виходячи із умови  $V_y + \omega_z R = 0$  звідки,

$$R = -\frac{V_y}{\omega_z} \quad (1)$$

де  $R$  – відстань від ЦО до ПП, м;

$V_y$  – бокова швидкість судна, м/сек;

$\omega_z$  – кутова швидкість судна у каналі рискання, град/сек [14].

У випадку, коли обертального руху немає, кутова швидкість  $\omega_z = 0$ . Згідно з формулою (1) у такому випадку отримуємо невизначеність при діленні на 0. Тобто, ПП знаходиться в нескінченності, що відповідає прямолінійному поступальному руху і відсутності обертального. Ця формула використовується в усіх випадках визначення положення ПП.

У роботі [15] автор показує, як можна розрахувати положення ЦО та ПП на практиці.

Багато уваги приділяється подоланню небезпечних явищ, таких, як «гірдінг». Під впливом зовнішніх факторів, коли судно, зазвичай буксир, буксирується лагом до буксирної лінії і не може вийти з цього положення, створюється ситуація, яка називається «гірдінг» (girding).

Так, у роботах [16] (рис. 3), [17] (Рис 4.) та [3] Рис. 5) показані приклади утворення «гірдіngu».



Рисунок 3 – Приклад гірдіngu, що трапився при буксируванні баржі [16]

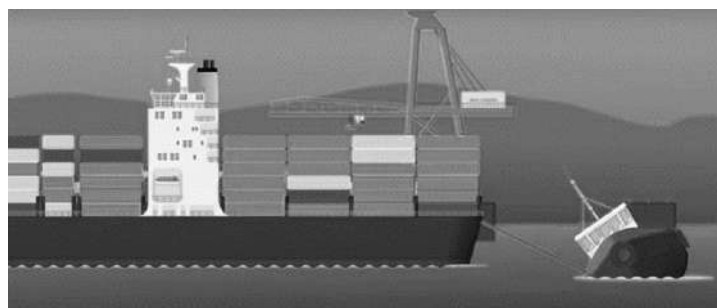


Рисунок 4 – Приклад гірдіngu, що трапився при роботі буксиру в кормі судна як утримувача [17]

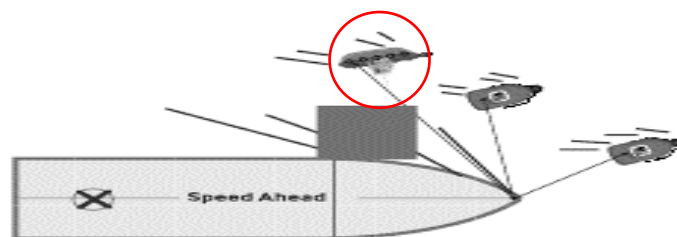


Рисунок 5 – Приклад гірдіngu, коли в таку ситуацію потрапляє буксир закріплений на носу судна [3]

Фактори, які можуть призвести до ситуації «гірдингу»:

- Придатність буксира – потужність, розмір, маневреність та видимість.
- Довжина буксирного троса – короткі троси зменшують час реакції.
- Точка буксирування – створює негативну силу стійкості.
- Характеристики буксирувального троса – розмір, вага, імпульс.
- Кут буксирного троса.
- Умови навколишнього середовища – вітер, приплив, течія, глибина води.
- Водонепроникність буксира [16].

Прикладів, коли при гірдингу сталися аварії буксирів, було декілька [16, 17, 21, 22].

Найбільш резонансним була катастрофа буксиру-якорезавізника “Bourbon Dolphin” [22].

12.04.2007 буксир-якорезавізник “Bourbon Dolphin” працював на завезенні якорів для напівзануреної бурової “Transocean Rather” у Норвезькому морі. Глибина моря була 1100 м і завозились якорі з якірними лініями довжиною близько 3500 м, які склались з ланцюгів і тросів. На той час погодні умови були наступними: південно-західний вітер до 35 вузлів і хвилювання з висотою значних хвиль близько 3,5 м, а максимальних – до 7 м.



Рисунок 6 – Судно Bourbon Dolphin  
в 16.31 12.04.2007 р., [22]

На час 16.31 “Bourbon Dolphin” витравив вже 1817 м ланцюга і приблизно 220 м троса. (рис. 6). Хвилювання і вітер зносили його з курсу. На цей час він був на дистанції 2119 м від місця покладання якоря і на 948 м був знесений від лінії прокладки якоря. “Bourbon Dolphin” маневрував, щоб продовжити якорезавезення. Якірна лінія лежала на палубі між двома буксирними штифтами правого борту. Ліві штифти були в наступному стані: внутрішній був опущений, а зовнішній – піднятий. “Bourbon Dolphin” намагався наблизитись до лінії прокладання якоря, машини працювали з максимальним навантаженням. Якірна лінія перемістилась ліворуч, буксир почав хилитися на лівий борт. Внутрішній штифт правого борту опустили. Якірна лінія перемістилась до зовнішнього штифта лівого борту. Трохи пізніше “Bourbon Dolphin” збільшив крен на лівий борт. Правий двигун зупинився, трапилось знеструмлення. О 17.08 “Bourbon Dolphin” перевернувся [22].

Після декількох подібних аварій, завершальною з яких була аварія “Bourbon Dolphin”, міжнародні морські організації, такі як ММО, класифікаційні товариства і інші організації, пов’язані з цією тематикою, встановили нові вимоги до суден, які зайняті в буксируванні, якорезавезенні і подібних операціях, стосовно нормування безпеки при проведенні таких операцій [18, 23]. Це стосується в першу чергу норм остійності. Вказується, що судна, зайняті в буксирувальних операціях, повинні мати достатній запас остійності, щоб протидіяти моменту, що нахилає, який виникає від дії буксирної лінії без загрози безпеки судну-буксиру [24].

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є визначення положення базових точок повороту при буксируванні і використання їх під час керування буксирним караваном при виконанні поворотів і при запобіганні виникненню небезпечних ситуацій.

**Задачі дослідження.** Задачами дослідження є: аналіз літературних джерел та пошук аналогів і прототипів; розробка схеми повороту буксирного каравану, з урахуванням переміщення базових точок під час маневру, послідовності дій при повороті буксирного каравану з використанням концепції полюса повороту.

**Викладення основного матеріалу.** Положення базових точок змістовної моделі повороту об'єкта буксирування. При буксируванні караван може рухатись зі швидкістю, яка не перевищуватиме максимальної, тобто, коли опір всього каравану не перевищуватиме максимального упору гвинта. Оскільки стернування буде відбуватися шляхом пера чи пер керма, що розташовані в кормі, полюс повороту (ПП) буксиру буде розташований у носовій частині судна [13].

Під час повороту судна картина змінюється.

Потрібно буде враховувати також положення буксирної точки (БТ) – точки, в якій сила натягу буксирного троса прикладається до буксира [4].

В ідеалі БТ має бути розташована в ЦО [13], щоб надати буксиру максимальну свободу обертання при стернуванні. Ось чому буксирну лебідку встановлюють якомога далі вперед від корми та якомога ближче до ЦО, наскільки це можливо. Буксирна лебідка розташована щонайближче від ЦО, а полюс повороту (ПП) без об'єкта буксирування при керуванні судна звичайним кермом, яке розташоване в кормі судна, зазвичай розташований на центральній лінії приблизно на одній третині довжини буксира від носа. Точки ЦО та ПП – базові точки змістовної моделі повороту судна [13]. З практичного погляду, БТ позначається як буксирна лебідка або буксирні кнехти, якщо вони встановлені або додаткові елементи, на які може опиратися буксирний трос при маневруванні.

Однак при розташуванні буксирної БТ близько до ЦО при напрямку буксирної лінії перпендикулярно до ДП виникає дуже висока ймовірність гирдингу. «Гирдинг» – це ситуація, коли судно, зазвичай буксир, буксирується лагом до буксирної лінії і не може вийти з цього положення.

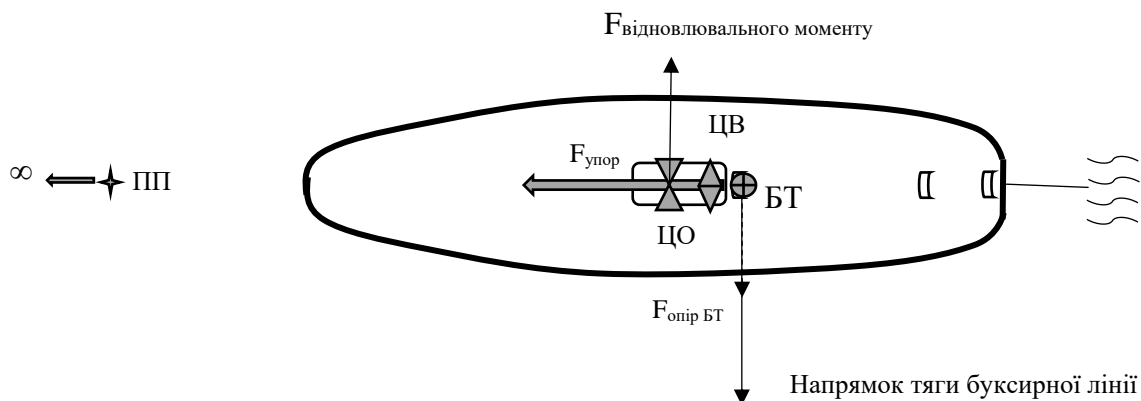


Рисунок 7 – Ситуація гирдингу, коли напрямок тяги буксирної лінії стає перпендикулярним до діаметральної площини буксира. Сили, що діють під час буксирування у горизонтальній площині

Що стосується горизонтальної площини, то на рис. 7 видно, що боковими силами, які діють в протилежних напрямках і намагаються перебороти одна одну є сила тяги буксирної лінії і сила відновлювального моменту. З погляду безпеки нам потрібно, щоб відновлювальний момент завжди був не менший ніж момент сил, що накреньють.

Тепер розглянемо дію бокових сил у вертикальній площині (рис. 8).

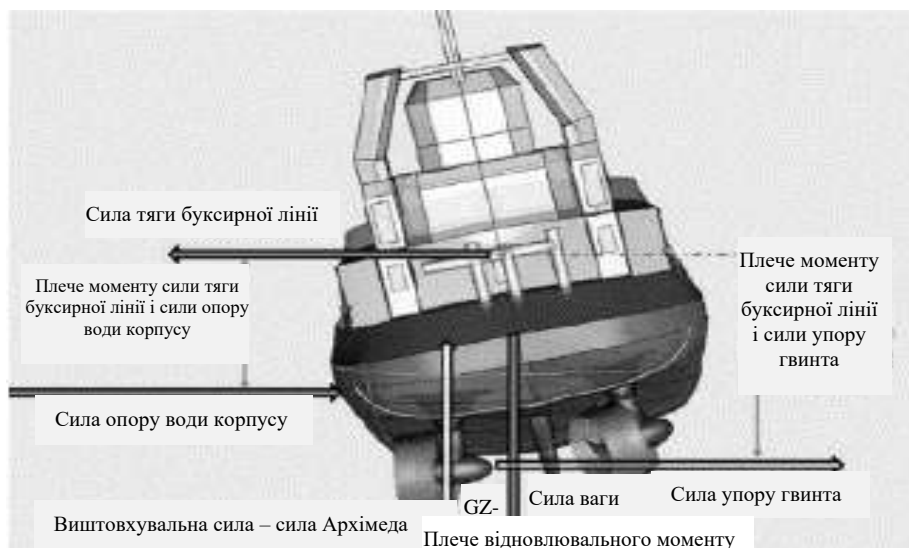


Рисунок 8 – Сили, що діють під час буксирування у вертикальній площині [3]

Якщо напрямок буксирної лінії опиниться перпендикулярним до діаметральної площини буксира (рис. 7), то в вертикальній площині на нього буде діяти момент, що нахилиє, створений силою тяги буксира, яка прикладена до БТ, та силою опору води, яка прикладена до центру бокового опору, точки, яка при відсутності поздовжньої швидкості співпадає з центром величини ( $\text{Ц}_{\text{вел}}$ ) – центром підводної частини буксира. Протистояти цьому моменту буде відновлювальний момент, утворений силою ваги, яка прикладена до ЦВ, і силою Архімеда (виштовхувальною), яка прикладена до  $\text{Ц}_{\text{вел}}$ . До сил, які утворюють ці моменти, може додаватись поперечна складова сили упору гвинта в той чи інший бік залежно від перекладки керма (рис. 8). Якщо момент, що нахилиє, перебільшить відновлювальний момент, судно може перекинутись. Горизонтальний момент, який утворюється силою тяги буксирної лінії, що прикладена до БТ і силою відновлювального моменту, яка прикладена до ЦО, буде досить малим і не впливатиме на переміщення базових точок і напрямку руху буксира через те, що БТ розташована щонайближче до ЦО.

Цій проблемі приділяється увага і в світовому морському співтоваристві. Так, у [18] судам-постачальникам в офшорі присвячувалася глава 4.5 "Offshore supply vessels", де перераховані критерії остійності для таких суден. Після катастрофи з «Bourbon Dolphin» ММО прийняло Resolution ІМО А.749(18) [23], де були прийняті обмеження для максимально допустимих вертикальних та горизонтальних (поперечних) сил/натягів, які може випробувати судно в найбільш несприятливих умовах для поперечних сил/натягів до досягнення максимального кута крену, обмеженого одним з наступних кутів, залежно від того, який з них менший:

1. Кут крену еквівалентний значенню  $GZ$ , що відповідає 50% від  $GZ_{\text{max}}$ ;
2. Кут заливання робочої палуби, причому палуба вважається плоскою;
3. 15 °.

Між буксиром і об'єктом буксирування можуть бути великі відносні рухи. Між буксирним тросом і кормою буксира також можуть бути значні відносні рухи, особливо поворот або зміщення в поперечному напрямку. Обладнання для контролю цих рухів еволюціонувало протягом історії буксирування. Зараз для цього використовують вертикальні обертальні вали на кормі (Stern Rollers), норманські штифти (Norman pins) (рис. 9), стаціонарний гоб(гог) (рис. 10а), гоб-ланцюг (Gob Chain) (рис. 10б), тросові відтяжки (рис. 11) [3].

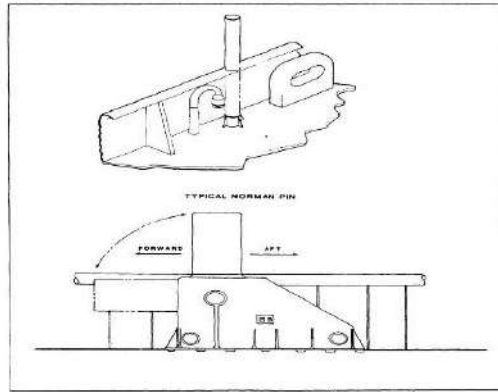


Рисунок 9 – Норманські штифти (Norman Pins [4])



а)



б)

Рисунок 10 – Стационарний гоб (гоб) – пристрій для запобігання ризиканню буксирного троса (а), та Гоб (гоб) ланцюг – пристрій для запобігання ризиканню буксирного троса (б). Фото автора

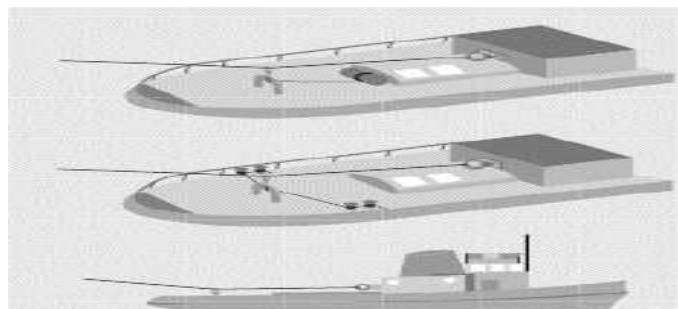


Рисунок 11 – Встановлення тросової відтяжки [3]

Як видно з рис. 5 при гирдінгу судно розташовується лагом до буксирної лінії і не може виконувати обертальний рух. А якщо обертального руху немає, то немає кутової швидкості  $\dot{\varphi}$ , згідно з формулою (1) ПП розташовується по лінії ДП у нескінченності. А БТ співпадає з ЦО, який за відсутності поздовжнього руху буксира співпадає з ЦВ.

Шляхом зміщення точки буксирування в корму або за допомогою відтяжки з ланцюга або тросу схильність до гирдінгу буксиру можна покращити на конвенційних буксирах (рис. 11). Гоб-трос або ланцюг, який іноді називають вуздечкою, – це короткий трос або ланцюг, який швидко приєднуються до буксирної лінії в кормовій частині буксира. Таким чином, використання відтяжки ефективно переміщує точку буксирування назад, ближче до корми буксира. Це надає капітану буксира більший контроль і забезпечує більшу маневреність, щоб запобігти гирдінгу, коли буксир виконує роль кормового буксира. Деякі портові адміністрації вимагають, щоб усі конвенційні буксири використовували відтяжку.

Тросова відтяжка (також її називають вуздечкою) може бути встановлена різними способами, включаючи спосіб, зазначений на рисунку 11б, які використовують довжину троса, закріплену на буксирі, який проходить через клюз або відповідний кронштейн на центральній лінії робочої палуби. На кінці троса утримується велика скоба, яка кріпиться навколо буксирної лінії. Велика скоба вільно ковзає вздовж буксирної лінії. Коли буксирна лінія рухається до борту буксира, трос вуздечки натягується і утримує точку буксирування в кормі і близько до середини судна. Іншим методом встановлення тросової відтяжки є наявність окремої лебідки з тросом, який виконує роль відтяжки, що веде через вертлюг, розташований на центральній лінії в кормі буксира. Скоба використовується для ковзання вздовж буксирної лінії, а лебідка використовується для варіювання довжини гоб-тросу. Очевидно, що довжину не можна змінюватись, коли гоб-трос знаходиться під натягом [3].

Завдяки цим пристроям ймовірність гирдінга значно зменшується і капітану буксира потрібно тільки моніторити натяг буксирного троса, щоб він не перевищував дозволені межі [18, 23, 24].

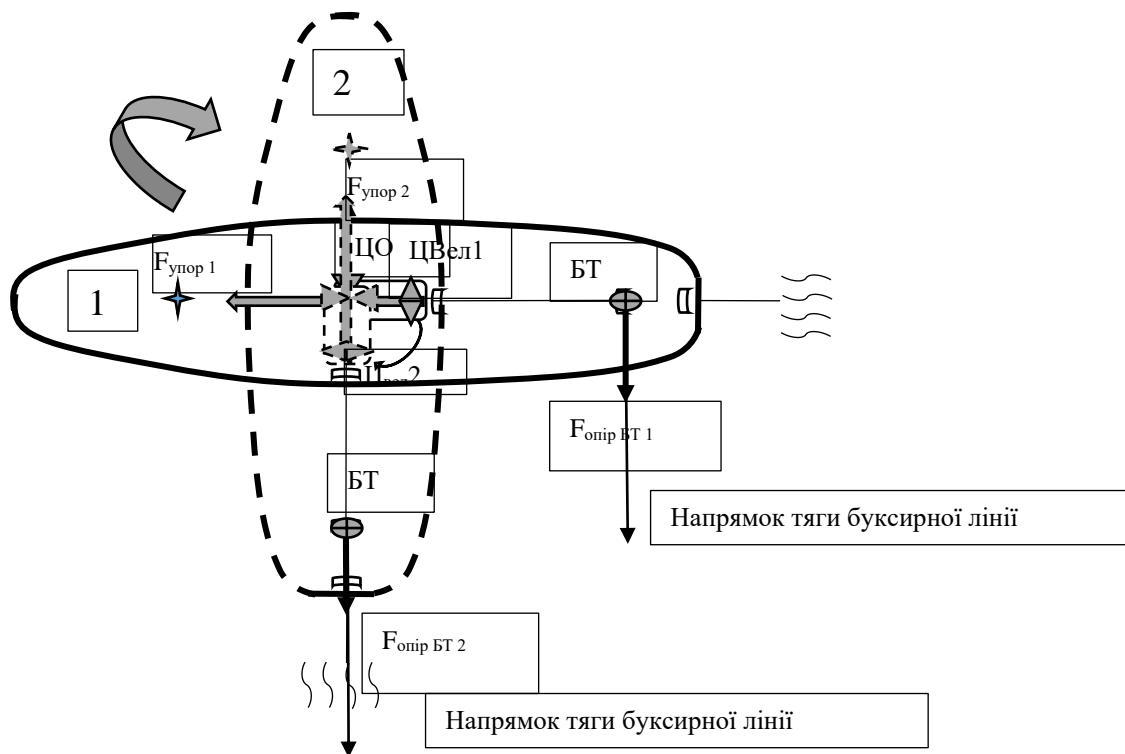


Рисунок 12 – Розворот у горизонтальній площині буксира, що має хід вперед, під дією пари сил: сили натягу буксирного каната, прикладеного до БТ, що перенесена більше в корму, і сили опору води, що прикладена в Ц<sub>вел</sub>

У разі, коли буксир йде вперед і БТ перенесена в корму від ЦВ, при напрямку буксирної лінії перпендикулярно діаметральній площині, сила натягу буксирної лінії, що прикладена до БТ і сила опору води, що прикладена до Ц<sub>вел</sub>, який розташовується на одній вертикалі є ЦВ, утворюють пару сил, що прагне розвернути буксир з положення 1 до положення 2 (рис. 12). Якщо протидії цій парі сил немає, то буксир так і розвертається і запобігає гирдінгу. Це відбувається тому, що у положенні 1 відновлювальний момент залежить від поперечної метацентричної висоти, а в положенні 2 – від поздовжньої метацентричної висоти, яка в багато разів більша і тому остійність судна в багато разів більша в поздовжньому напрямку, ніж у поперечному.

Але завданням буксира є відбуксирувати якийсь об'єкт у задану точку, тому він має використовувати тягу гвинта для утворення поздовжньої швидкості і перо керма для відхилення потоку від гвинта і утворення сили в потрібному напрямку (рис. 13), де

$F_{упор}$  – упор гвинта буксира;

$F_{\text{опір}}$  – сила опору води буксира;

$F_{\text{упор}} = F_{\text{опір}} = F_{\text{тяги}}$  – сила тяги буксира;

$F_{\text{опір БТ}}$  – сила тяги буксирної лінії (опір об'єкта буксирування);

$F_{\text{опір БТ X}}$  – сила тяги буксирної лінії – поздовжня складова;

$F_{\text{опір БТ Y}}$  – сила тяги буксирної лінії – поперечна складова;

$F_{\text{опір К}}$  – сила опору води перекладеному керму;

$F_{\text{опір К X}}$  – сила опору води перекладеному керму – поздовжня складова;

$F_{\text{опір К Y}}$  – сила опору води перекладеному керму – поперечна складова.

Для запобігання гирдінгу БТ пересувають якомога далі в корму. Уявімо, що БТ розташована максимально в кормі, у районі розташування вертикальних обертальних валів. Перо керма розташоване також у кормі і залежно від конструкції центр пера керма може бути також на одній вертикалі з БТ.

Розкладемо силу тяги буксирної лінії  $F_{\text{опір БТ}}$  на поздовжню  $F_{\text{опір БТ X}}$  та поперечну  $F_{\text{опір БТ Y}}$  складові. Силу опору води перекладеному керму  $F_{\text{опір К}}$  також розкладемо на поздовжню  $F_{\text{опір К X}}$  та поперечну  $F_{\text{опір К Y}}$  складові.

Для руху вперед, як вже було згадано вище, тяга гвинта  $F_{\text{тяги}}$  має перевершувати сумарний опір буксира  $F_{\text{опір}} + F_{\text{опір К X}}$  і об'єкта буксирування  $F_{\text{опір БТ X}}$ .

Поперечні ж складові сили тяги буксирної лінії  $F_{\text{опір БТ Y}}$  та сили опору води перекладеному керму  $F_{\text{опір К Y}}$  будуть протидіяти одна одній і ускладнювати керування судном. Положення БТ і натяг буксирного троса створюють момент, який протидіє моменту керма і обмежує поворотний рух буксира. Здатність буксира до утримування курсу стає все більш ускладненим, оскільки точка буксирування переміщується далі назад. Цей вплив посилюється на низькій або нульовій швидкості [4]. При цьому буксир стає нездатним змінювати курс. Це є положення, коли буксир потрапляє в положення «в кайданах» (“in irons”). Термін «в кайданах» (“in irons”) [4] вважаю краще замінити терміном «в лещатах», який показує, що судно двома боковими силами затиснуте в такому положенні, що не може змінити курс, використовується для опису умов, коли протидіючий момент буксирного троса такий самий або більший за поворотний момент, створюваний кермом та іншими гідродинамічними силами. Тоді буксир стає нездатним керувати. Це може статися, коли сили  $F_{\text{опір К Y}}$  та  $F_{\text{опір БТ Y}}$  будуть дорівнювати одна одній. У цей момент БТ перетворюється в точку з необмеженим опором [12, 13]. Тому ЦО переміщуються в БТ. Буксир не може змінювати курс. Ситуація стає схожою з гирдінгом. Раз буксир не може змінювати курс, обертального руху немає і ПП знов по лінії ДП у нескінченності.

Як тільки буксир пересилує тягу буксирної лінії, знов з'являється поздовжня швидкість, ЦО переміщується в положення попереду ЦВ і буксир стає керованим. А положення «в лещатах» є дуже небезпечним. При перенесенні БТ у корму все одно зберігається небезпека гирдінгу і перекидання судна. Це дуже схоже на катастрофу буксир-якорезавізника “Bourbon Dolphin” [22].

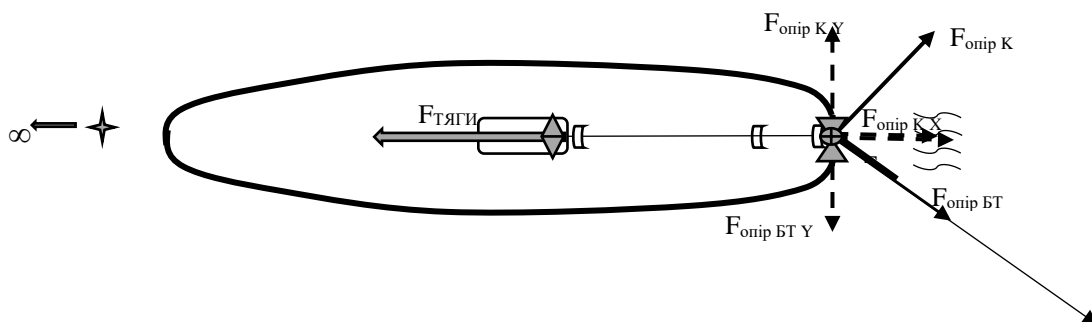


Рисунок 13 – Ситуація, коли буксир опиняється «в лещатах»

**Положення базових точок змістовної моделі повороту об'єкта буксирування.** Тепер розглянемо положення базових точок змістовної моделі повороту судна на об'єкті

буксирування. Положення ЦВ вираховується по вантажному плану об'єкта буксирування. Положення ЦО при відсутності ходу співпадає з положенням ЦВ. При початку руху положення ПП залежить від положення точки прикладання бокової сили. Сила тяги буксира прикладена до БТ об'єкту буксирування, яка знаходиться в його передній частині. При прямолінійному русі ПП об'єкта буксирування знаходиться в нескінченності.

При рисканні об'єкта буксирування ситуація стає схожою з рисканням судна навколо якірної клюза при стоянці судна на якорі. (При стоянці на якорі судно виконує складний рух: рух відносно якірної клюза, який виступає в якості точки з необмеженим опором, і рух самого якірної клюза відносно якоря або частини якірної ланцюга, який занурений у ґрунт – залежно від навантаження). Тобто, рискання відбувається відносно БТ об'єкта буксирування, який розташований у носовій частині судна.

На тренажері "Navi-Trainer Professional 5000" (Wärtsilä) був проведений експеримент повороту буксира з об'єктом буксирування. На рис. 14 показані результати експерименту. З цього рисунку можна зробити висновок, що при повороті буксира з об'єктом буксирування останній повторює траєкторію буксира з більшим виносом на зовнішній бік повороту за рахунок інерції прямолінійного руху об'єкта буксирування, який намагається змінити буксир шляхом прикладання бокової сили, прикладеної в носовій частині об'єкта буксирування.

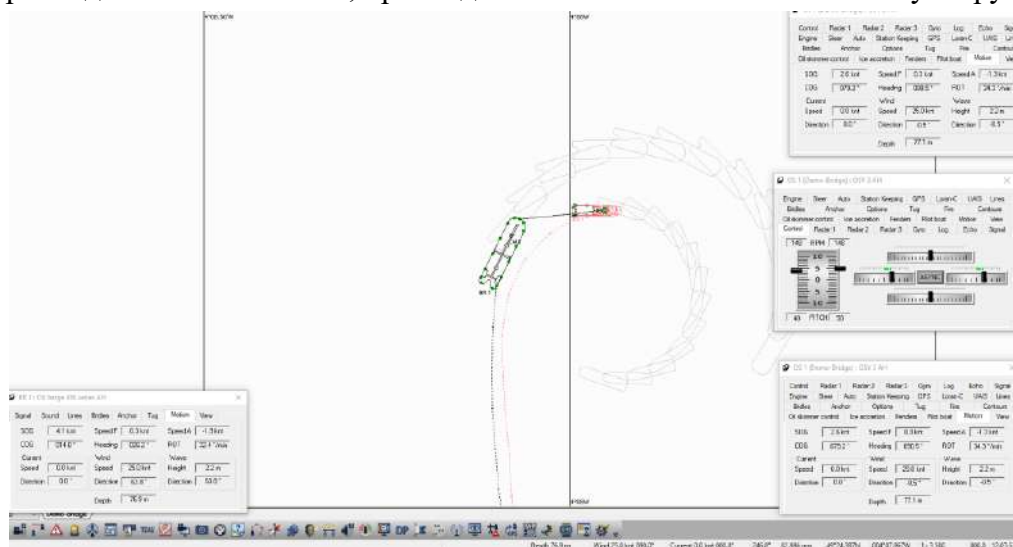


Рисунок 14 – Поворот буксира з об'єктом буксирування.

Скан 1 з тренажера "Navi-Trainer Professional 5000" (Wärtsilä). Фото автора

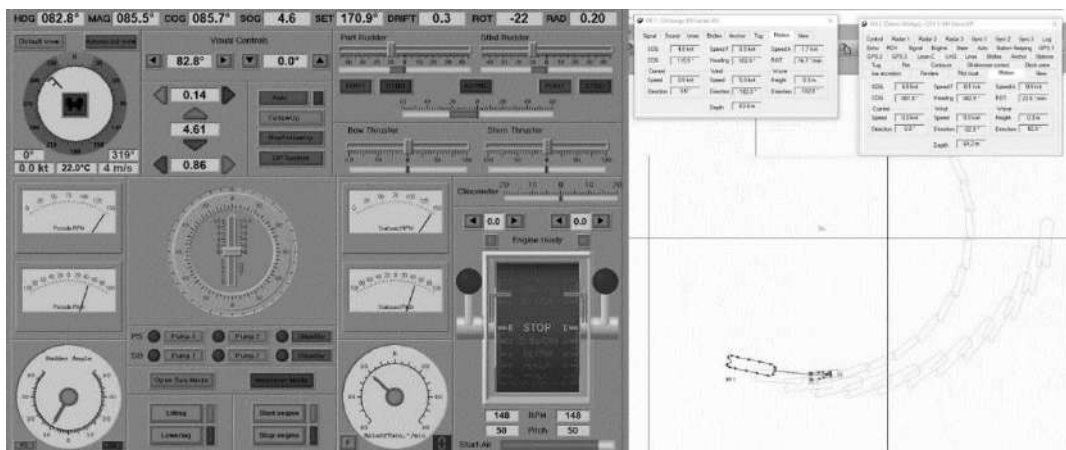


Рисунок 15 – Поворот буксира з об'єктом буксирування.

Скан 2 з тренажера "Navi-Trainer Professional 5000" (Wärtsilä). Фото автора

На лівій частині рис. 15 показана панель керування буксиром, а на правій – траєкторія руху буксира і об'єкта буксирування і числові дані повороту буксира і об'єкта буксирування. Для об'єкта буксирування БТ буде в місці кріплення буксирного троса до

об'єкта буксирування, тобто в носовій частині. ЦО знаходиться також у БТ. Розташування ПП залежить від бокових швидкостей носа та корми. Якщо в даному випадку вони спрямовані в один бік (у бік лівого борту), то ПП буде попереду носу судна. Якщо ж швидкості будуть різноспрямованими (у бік різних бортів), то ПП буде в межах корпусу судна ближче до кінця судна, де бокова швидкість менша.

При зміні напрямку руху буксира, наприклад, з напрямку за годинниковою стрілкою на напрямок проти годинникової стрілки, об'єкт буксирування також змінює сторону руху відносно шляху буксира, залишаючись завжди на зовнішньому боці від руху буксира (рис. 16).

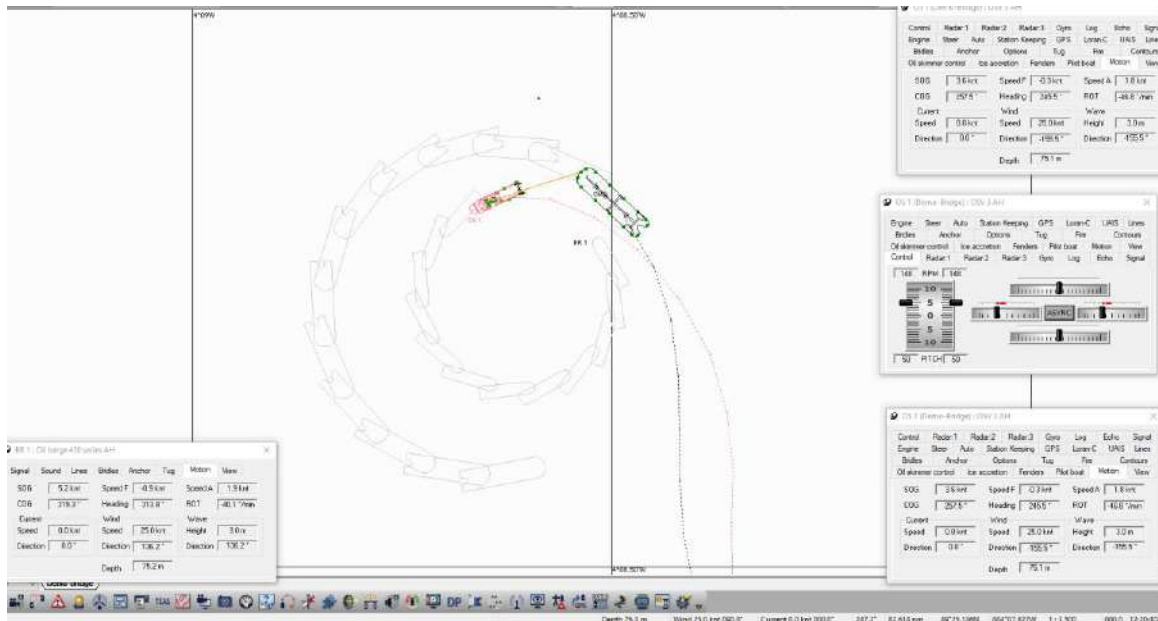


Рисунок 16 – Траєкторія повороту буксира з об'єктом буксирування при зміні напрямку руху. Скан 3 з тренажера "Navi-Trainer Professional 5000" (Wärtsilä). Фото автора

При русі судна лагом під дією двох буксирів [7, 8] автори вважають, що ПП рухається вперед – назад залежно від напрямку руху судна і не виходить за межі корпусу судна. Цей випадок розглянутий у [15]. При однаковій швидкості обох буксирів – відсутність поздовжньої швидкості. ЦО співпадає з ЦВ. ПП – у нескінченності.

При наявності різниці в швидкості руху буксирів, коли вони обидва рухаються в одному напрямку – ЦО зміщується в бік буксира з меншою швидкістю. ПП буде розташовуватись за межами судна в напрямку буксира з меншою швидкістю.

Це тлумачення базується на новому баченні змістовної моделі повороту судна, викладеному в статтях [12, 13].

### Основні результати та їх обговорення.

1. У статті показано, що положення базових точок повороту, показане в джерелах [3, 4, 7, 8], не відповідає дійсності.
2. Завдяки цьому пояснення ситуацій “girding” («гірдінг») та “in irons” («в лещатах») також не відповідає дійсності.
3. Надані пояснення ситуацій “girding” («гірдінг») та “in irons” («в лещатах») з урахуванням останніх досягнень теорії та практики.
4. Додане поняття буксирної точки (БТ) – точки, в якій сила натягу буксирного троса прикладається до буксира, яка входить до переліку базових точок повороту буксира.
5. Також до переліку базових точок повороту буксира входить центр величини – центр підводної частини буксира.
6. Використовуючи тренажер "Navi-Trainer Professional 5000" (Wärtsilä) автори дослідили траєкторію руху буксира з об'єктом буксирування.

### **Висновки.**

– При розрахунку повороту буксира беруться до уваги наступні базові точки: центр ваги (ЦВ), центр величини (Ц<sub>всл</sub>), центр обертання (ЦО), буксирна точка (БТ), полюс повороту (ПП).

– При буксируванні за кормою на тросі ЦО буксира – попереду ЦВ, ПП – попереду ЦО в межах корпусу судна.

– При положенні «гірдінг» ЦО буксира – в БТ, ПП – у нескінченності.

– При положенні «в лещатах» – ЦО буксира – у БТ, ПП – у нескінченності. Це положення схоже на положення «гірдінг».

– При положенні буксира близькому до положення « в лещатах» – ЦО буксира переміщується в бік БТ, ПП – переміщується вперед за межі судна.

– При русі вперед БТ об'єкта буксирування попереду ЦВ, ЦО співпадає з БТ, ПП – попереду ЦО за межами корпусу об'єкта буксирування.

– При буксируванні буксир рухається по наміченій планом переходу траєкторії переднім ходом.

– Об'єкт буксирування рухається по траєкторії, яка асимптотично прагне до траєкторії буксира. При поворотах траєкторія руху об'єкта буксирування буде розташовуватись із зовнішнього боку повороту.

– Для виходу з положення «в лещатах» потрібно збільшення потужності, якщо є така можливість, і продовження руху вперед. Як можливості збільшення потужності вже немає, можна зменшити потужність, надати можливість буксирній лінії розвернути буксир вздовж буксирної лінії і потім знов збільшувати потужність. Це збільшить остійність буксира і завадить небезпеці. Розігнавши буксирний караван до можливої швидкості на новому курсі, можна починати поступовий перехід на попередній курс.

**Перспективи продовження дослідження.** Додаткового дослідження вимагає поведінка буксирної лінії і всієї системи буксир – об'єкт буксирування при повороті. Також, оскільки ця стаття описує положення базових точок повороту системи буксир та об'єкт буксирування, що є окремим прикладом змістовної моделі процесу повороту судна, то буде доцільним продовжувати дослідження на інших типах суден, наприклад, на двогвинтових суднах, на суднах з азиподами тощо. Також можна розглянути деякі судові операції, наприклад, швартування двох суден одне до одного в морі на ходу, судна на ходу до судна на якорі тощо.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Дьомін С. І. Керування судном / Дьомін С. І., Жуков Є. І. Та ін. М. : Транспорт, 1991. 359 с.

2. Репетей В. Д. Морські буксировки. (Рекомендації по організації морських буксировок суден та інших плавучих об'єктів, включаючи установки, спорудження та платформи) : навчально-практичний посібник, Одеса; серія ОБМ. Видавництво «Укромедінформ», 2006 стор. 176.

3. Maritime Safety: Tugs and Tows – Shipping industry Practical Safety and Operational Guide By maritimecyprus – 18/03/2024. <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2024/03/Tug-and-Tow-Safety-and-Operational-Guide.pdf>.

4. TB-55-1900-232-10. U.S. ARMY TOWING MANUAL. Доступ до джерела: <https://boatmanuals.tpub.com/TB-55-1900-232-10/index.htm>.

5. Cauvier H. The Pivot Point. The PILOT. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association. 2008. p. 295.

6. Butusina P. The Pivot Point Revisited, United Kingdom Maritime Pilots' Association "The Pilot", Autumn 2011, № 306. <https://ukmpa.org/wp-content/uploads/2016/06/Pilot-306-web.pdf>.

7. Behavior and Handling of Ships. Henry H. Hooyer (Author). Cornell Maritime Press; 1<sup>st</sup> edition (November 1, 1983), 152 p.

8. A Paradigm Shift in Shiphandling (The Pivot Point) Dr. Seong-Gi SEO Captain Kevin EARL. 15<sup>th</sup> April 2015. Warsash Maritime Academy, Southampton Solent Univity.
9. Cummins T. Scientific Fact: The ‘traditional’ understanding of the ship’s pivot point is wrong!, A review of the ship’s pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong>.
10. Cummins T. Where is the centre of a ship’s rotation?, A review of the ship’s pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/84506-review-of-ships-pivot-point-science-maths-and-observation-where-is-centre-of-ships-rotation>.
11. A Corrected Version on Positioning of Pivot Point. by Capt. Santosha K. Nayak - published on 18 November 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/129891-corrected-version-on-positioning-of-pivot-point>.
12. Pivot point position determination and its use for manoeuvring a vessel. Zinchenko Serhii, Tovstokoryi Oleh, Nosov Pavlo, Popovych Ihor & Kyrychenko Kostiantyn/*Ships and offshore structures, volume 17, issue 11 (2022)*. Received 06 Feb 2020, Accepted 07 Mar 2022, Published online: 28 Mar 2022., Volume 18 Issue 3(2023). P. 358–364. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2052480>. <https://www.tandfonline.com/eprint/JTNNAFIUT7WTMRNB U3EK/full?target=10.1080/17445302.2022.2052480>. ISSN Print ISSN: 1744-5302 Online ISSN: 1754-212X. SCOPUS.
13. Tovstokory O. M. Substantive model of ship turn with account of the latest achievements in theory and practice. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.152-163> Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал № 2(29) (2024). С. 152–163.
14. Tzeng Ch. Analysys of the pivot point for a turning ship. Journal of marine science and technology. Vol. 6, Issue 1, pp. 39–44. 1998. <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/6/39-44.pdf> <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2518>.
15. Товстокорій О. М. Практичні методи розрахунку положення базових точок змістовної моделі повороту судна. Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал № 1(30) (2025). С. 152–163. Категорія Б. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.247-257>.
16. Girding danger under the spotlight. 07 Oct 2019 by Martyn Wingrove. Riviera maritime media. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/girding-danger-under-the-spotlight-56417>.
17. Why You Shouldn't Tug A Tug. Video. Доступ до джерела: <https://www.youtube.com/watch?v=TRb46C4NXzU>.
18. Resolution MSC.415(97) (adopted on 25 November 2016) amendments to part b of the international code on intact stability, 2008 (2008 is code).
19. Guidelines for Offshore Marine Operations. Revision: 0611-1401 on 06/11/2013 / The North West European Area. Режим доступу до джерела: <https://omtc.ua/images/courses/dp/GOMO.pdf>.
20. Towing Resistance and Design of a Towing Scheme for a Floating Wind Turbine. Pengfei Gao 1 , Xiaobin Yuan 1 , Shihua Liu 1 , Wen Lin 1 , Mingsheng Chen 2, Zhiqiang Wang 2, Yichang Tang 2 and Xingyu Jiang. 16 April 2025. <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/4/789#Introduction>.
21. Tug Girding. Transportation Safety Board of Canada. TSB Canada releaser wsdeo about tug girding. October 10, 2019 <https://www.iims.org.uk/tsb-canada-release-video-about-tug-girding/>.
22. The Loss of the “Bourbon Dolphin” on 12 April 2007. Official Norwegian Reports. Report from a Commission appointed by Royal Decree of 27 April 2007. Submitted to the Royal Norwegian Ministry of Justice and the Police on 28 March 2008. Government Administration Services. Information Management. Oslo 2008.

23. Resolution IMO A.749(18) dd 04.11.1993 «Code of intact stability for all types of ships covered by IMO instruments» [Електронний ресурс] / International marine organization. Режим доступу до сайту: <http://www.imo.org/>. Назва з екрану.

24. Товстокорий О. Н., Нестеренко В. Б., Завальнюк О. П. Особливості контролю остійності буксирних суден при маневруванні на шельфі. Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. Випуск №1(20). Херсон: Видавництво ХДМА, 2019. №1(20). С. 75–81. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2019.1.20.040-046>.

## REFERENCES

1. Domin, S. I. et al. (1991). *Keruvannia sudnom*, M.: Transport, 359 с.
2. Repetej, V. D. (2006). *Morsri buksyrovky. (Rekomendawii po organizatsii morskyh buksyrovok suden ta inshih plavuchih ob'ektiv, vkljuchajuchi sporudzhennjz nf platform) Navchalno-praktychnyj posibnyk, – Odesa; serija OBM. Vydavnytstvo “Ukromedinform” 176.*
3. *Maritime Safety: Tugs and Tows – Shipping industry Practical Safety and Operational Guide* By maritimecyprus – 18/03/2024. <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2024/03/Tug-and-Tow-Safety-and-Operational-Guide.pdf>.
4. TB-55-1900-232-10. U.S. ARMY TOWING MANUAL. Address: <https://boatmanuals.tpub.com/TB-55-1900-232-10/index.htm>.
5. Cauvier, H. (2008). *The Pivot Point. The PILOT. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association.* p. 295.
6. Butusina, P. (2011). *The Pivot Point Revisited, United Kingdom Maritime Pilots' Association “The Pilot”, Autumn 2011, № 306.* <https://ukmpa.org/wp-content/uploads/2016/06/Pilot-306-web.pdf>.
7. *Behavior and Handling of Ships.* Henry H. Hooyer (Author). Cornell Maritime Press; 1<sup>st</sup> edition (November 1, 1983), 152 p.
8. *A Paradigm Shift in Shiphandling (The Pivot Point)* Dr. Seong-Gi SEO Captain Kevin EARL. 15<sup>th</sup> April 2015. Warsash Maritime Academy, Southampton Solent Univity.
9. Cummins, T. (2020). *Scientific Fact: The ‘traditional’ understanding of the ship’s pivot point is wrong!*, A review of the ship’s pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. <https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong>.
10. Cummins, T. (2020). *Where is the centre of a ship’s rotation?*, A review of the ship’s pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. <https://www.marine-pilots.com/articles/84506-review-of-ships-pivot-point-science-maths-and-observation-where-is-centre-of-ships-rotation>.
11. *A Corrected Version on Positioning of Pivot Point.* by Capt. Santosha K. Nayak - published on 18 November 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/129891-corrected-version-on-positioning-of-pivot-point>.
12. *Pivot point position determination and its use for manoeuvring a vessel.* (2022). Zinchenko Serhii, Tovstokoryi Oleh, Nosov Pavlo, Popovych Ihor & Kyrychenko Kostiantyn / *Ships and offshore structures, volume 17, issue 11 (2022)*. Received 06 Feb 2020, Accepted 07 Mar 2022, Published online: 28 Mar 2022., Volume 18 Issue 3(2023). P. 358–364 <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2052480>. <https://www.tandfonline.com/eprint/JTNNAFIUT7WTMRNBU3EK/full?target=10.1080/17445302.2022.2052480>. ISSN Print ISSN: 1744-5302 Online ISSN: 1754-212X.
13. Tovstokoryj, O. M. (2024). *Substantive model of ship turn with account of the latest achievements in theory and practice.* DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.152-163 *Naukovyj visnyk Kherson state maritime academi: naukovyj zhurnal № 2(29)*. h 152–163.
14. Tzeng Ch. *Analysys of the pivot point for a turning ship.* *Journal of marine science and technology.* Vol. 6, Issue 1, pp. 39–44. 1998. <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/6/39-44.pdf>.
15. Tovstokoryj, O. M. (2025). *Praktychni metody pozrakhynku polozhennz bazovyh tochok zmistovnoi modeli povorotu sudna.* *Naukovyj visnyk Kherson stste maritime academy.*

Naukovyj zhurnal № 1(30) (2025). p. 152–163. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.247-257>.

16. Girding danger under the spotlight. 07 Oct 2019 by Martyn Wingrove. Riviera maritime media. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/girding-danger-under-the-spotlight-56417>.

17. Why You Shouldn't Tug A Tug. Video. Доступ до джерела: <https://www.youtube.com/watch?v=TRb46C4NXzU>.

18. Resolution MSC.415(97) (adopted on 25 November 2016) amendments to part b of the international code on intact stability, 2008 (2008 is code).

19. Guidelines for Offshore Marine Operations. Revision: 0611-1401 on 06/11/2013 / The North West European Area. Режим доступу до джерела: <https://omtc.ua/images/courses/dp/GOMO.pdf>.

20. Towing Resistance and Design of a Towing Scheme for a Floating Wind Turbine. Pengfei Gao 1, Xiaobin Yuan 1, Shihua Liu 1, Wen Lin 1, Mingsheng Chen 2, Zhiqiang Wang 2, Yichang Tang 2 and Xingyu Jiang. 16 April 2025. <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/4/789#Introduction>.

21. Tug Girding. Transportation Safety Board of Canada. TSB Canada releaser wsdeo about tug girding. October 10, 2019 <https://www.iims.org.uk/tsb-canada-release-video-about-tug-girding/>.

22. The Loss of the “Bourbon Dolphin” on 12 April 2007. Official Norwegian Reports. Report from a Commission appointed by Royal Decree of 27 April 2007. Submitted to the Royal Norwegian Ministry of Justice and the Police on 28 March 2008. Government Administration Services. Information Management. Oslo 2008.

23. Resolution IMO A.749(18) dd 04.11.1993 «Code of intact stability for all types of ships covered by IMO instruments» International marine organization. <http://www.imo.org/>.

24. Tovstokoryj, O. M., Nesterenko, V. B., Zavalnjuk, O. P. (2019). Osoblyvosti kontrolju ostijnosti buksyrnyh suden pry buksyruvanni na shelfi. Naukovyj visnyk Kherson stste maritime academy. Vypusk №1(20). Kherson: Vydavnysttvo KSMA. №1(20). p. 75–81. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2019.1.20.040-046>.

**Tovstokoryj O. M., Nahrybelnyi Y. A., Matejchuk V. M. TOWING TURN THEORY TAKING INTO ACCOUNT THE LATEST ADVANCEMENTS IN THEORY AND PRACTICE**

*The object of the study is the process of turning vessels during towing. The article is devoted to finding out the position of the base points of the vessel's turn during towing. At least two units take part in towing: the tug and the towed object. The positions of the base points are different for each of the participants in the towing process. The trajectory of the towing caravan depends on the position of the base points. First, the base points for the tug and for the towed object are determined. It turns out that when towing, during the turn, the tug can expect serious dangers: girding and the position "in irons", which can lead to the tug tipping over.*

*When comparing previous sources on this issue, it turns out that the process of turning during towing was not considered in the way that the modern substantive model of vessel turning suggests.*

*In addition to determining the basic turning points of all towing participants, there is a need to find out how the tugboat, the towed object and the towing line will move. This also affects the water area occupied by the towing caravan when turning. Which affects the safety of navigation.*

*An accident that occurred with an anchor handling tugboat due to girding is also considered.*

*The conclusions show the position of the base turning points during towing and the change of their positions during various maneuvers, including in dangerous situations of "girding" and "in irons". IMO recommendations are provided for the prevention of these situations along with guidance on actions to be taken if you get into a "in irons" position.*

**Key words:** tugboat; towed object; girding; position "in the iron"; trajectory of movement; center of rotation; pivot point; towing point.

© Товстокорій О. М., Нагрибельний Я. А., Матейчук В. М.

Статтю прийнято до редакції 21.01.2026