

WPLYW ROZKŁADU DEFORMACJI NA DŁUGOŚCI KADŁUBA NA WYZNACZANIE WYPORNOŚCI NA PODSTAWIE ZANURZEŃ POMIERZONYCH NA ZNAKACH ZANURZENIA

W artykule przedstawiono problemy wyznaczania wyporności oraz masy ładunku załadowanego na statek, na podstawie zanurzeń pomierzonych na znakach zanurzenia, związane z metodą uwzględniania w obliczeniach deformacji kadłuba, zwłaszcza rozkładu deformacji na długości kadłuba statku. Na podstawie szeregu obliczeń wytrzymałości kadłuba różnych statków, w różnych stanach załadowania, przeprowadzono analizę położenia maksimum deformacji na długości kadłuba. Przedstawiono również inne problemy związane z deformacją kadłuba, mające wpływ na wyznaczanie wyporności statku.

WSTĘP

Jedną z wielkości opisujących ładunek znajdujący się na statku jest jego masa. Przy przewozie ładunków zjednostkowanych wystarczy znać przybliżoną jej wartość (znaczenie ma liczba skrzyń, palet, kontenerów itd.), natomiast w przypadku ładunków masowych jest to jedyna wielkość opisująca ilość ładunku przewożonego przez statek. Teoretycznie masę ładunku masowego można wyznaczyć, znając jego współczynnik sztauerski K lub gęstość ρ oraz poziom zapełnienia ładowni czy zbiorników ładunkowych. Na podstawie poziomu zapełnienia danej przestrzeni z tablic skalowania odczytuje się objętość ładunku v , a jego masę oblicza według wzoru:

$$m = \frac{v}{K} \quad \text{lub} \quad m = v \cdot \rho \quad (1)$$

Najczęściej jednak poziom zapełnienia nie jest równomierny dla całej ładowni nawet wtedy, gdy ładunek jest starannie roztrzymowany (wyjątek stanowią ładunki płynne na statku bez przegłębienia i bez przechyłu – dość rzadki przypadek), a wartości K i ρ , podawane w dokumentach ładunkowych, najczęściej są wielkościami przybliżonymi. Różnice między podanymi i rzeczywistymi wartościami K czy ρ są wprawdzie niewielkie, ale przy dużej objętości ładunku mogą powodować znaczne błędy przy wyznaczaniu jego masy. Wartość współczynnika sztauerskiego

może być uzależniona również od wysokości, z której ładunek jest sypany do ładowni. Zwyczajowo współczynnik sztauerski podawany jest z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku, a więc z odchyłką $\pm 0,005 \text{ m}^3/\text{t}$, co przy objętości 100 tys. m^3 ładunku o współczynniku sztauerskim $1,35 \text{ m}^3/\text{t}$ oznacza, że w skrajnym przypadku masa zostanie wyliczona z błędem 275 ton. Błąd ten może być jeszcze większy, gdyż zdarza się, że objętości podane w tablicach skalowania przestrzeni ładunkowych różnią się od wartości rzeczywistych. Statek, dla którego wykonano powyższą kalkulację, jest masowcem o wyporności maksymalnej rzędu 90 tys. ton. Przy zanurzeniach bliskich maksymalnemu do zmiany jego zanurzenia o 1 cm potrzebna jest zmiana wyporności o około 90–100 ton. Popełniony błąd obliczeń masy ładunku przekłada się na błąd pomiaru zanurzenia statku o ok. 3 cm. Można zatem przyjąć, że dokładniejszą metodą jest: określić wyporność statku na podstawie jego zanurzenia, a następnie masę ładunku wyznaczyć jako różnicę obliczonej wyporności i mas: statku pustego, zapasów, balastów i pozycji „różne” (załoga, prowiant itp.) oraz konstanty. Jeżeli masa statku pustego oraz masy pozostałych składowych wyporności (poza ładunkiem) są znane z odpowiednią dokładnością, to można by założyć, że dokładność metody zależy przede wszystkim od precyzji pomiaru zanurzenia statku.

Wyporność statku, ustalona na podstawie zanurzeń pomierzonych na znakach, poza określeniem masy ładunku może służyć do określenia wielkości konstanty – obejmującej takie pozycje, jak: drobne przeróbki konstrukcji, zmiany wyposażenia, kolejne warstwy farby na kadłubie nakładane w czasie remontów i konserwacji, dodatkowy osprzęt do mocowania ładunku, ponadstandardowe części zapasowe, osady w zbiornikach, medium w rurociągach, obrastanie kadłuba itp. Ustalanie wartości konstanty przeprowadza się na statku bez ładunku.

1. PROCEDURA WYZNACZANIA WYPORNOŚCI STATKU NA PODSTAWIE ZANURZEŃ POMIERZONYCH NA ZNAKACH ZANURZENIA

Procedura wyznaczania wyporności statku na podstawie zanurzeń pomierzonych na znakach zanurzenia popularnie określana jest mianem *draft survey* lub *draught survey* (ang.) i rozpoczyna się pomiarem zanurzeń na znakach zanurzenia umieszczonych na kadłubie na obu jego burtach, na dziobie, na rufie, a na statkach długich również na śródokręciu. Zasady przeprowadzania pomiaru zanurzeń oraz dokładny opis procedury *draught survey* można znaleźć w wielu publikacjach [1, 2, 3]. Zgodnie z założeniami metody, zanurzenia statku [8] powinny być pomierzone z dokładnością 1 cm, co w praktyce jest trudne do osiągnięcia i oznacza już na samym początku stosowania procedury błąd rzędu 0,5 TPC (TPC – zmiana wyporności na 1 cm zmiany zanurzenia). W przypadku statku typu „Panamax” (wyporność maksymalna rzędu 80–90 tys. ton) odchyłka zanurzenia 0,5 cm oznacza błąd nawet na poziomie 50 ton.

Zanurzenia odczytane na znakach lewej i prawej burty zostają uśrednione i przeliczone na zanurzenia na pionie dziobowym T_D , pionie rufowym T_R oraz na owrężu T_{\otimes} , które stanowią podstawę części obliczeniowej wyznaczania wyporności. Obliczenia wyporności mogą być przeprowadzone według dwóch schematów różniących się sposobem uwzględniania deformacji kadłuba. Oba schematy w skróconej formie opisano poniżej.

Analizując oba przedstawione schematy *draught survey*, łatwo zauważyć, że różnice między nimi sprowadzają się tylko do sposobu uwzględniania deformacji kadłuba. W metodzie pierwszej deformacja uwzględniana jest poprzez policzenie niezależnej poprawki ΔD_f , natomiast w metodzie drugiej deformacja uwzględniana jest poprzez policzenie zanurzenia średniego T_{MM} . Pomimo różnic w sposobie uwzględniania deformacji kadłuba obie metody dają zbliżone wyniki obliczeń – różnice obliczonych mas są nie większe niż 0,5 TPC.

Schemat obliczeń *draft survey* (metoda z niezależną poprawką na deformacje kadłuba)

1. Wyznaczenie zanurzenia średniego arytmetycznego, przegłębienia oraz strzałki ugięcia:

$$T_{SR} = \frac{T_D + T_R}{2} \quad t = T_D - T_R \quad f = T_{\otimes} - T_{SR}$$

2. Odczyty z danych hydrostatycznych: D_{KH} , TPC, $x_{S\otimes}$, α , $M_j(T_{SR} + 0,5 \text{ m})$, $M_j(T_{SR} - 0,5 \text{ m})$
3. Obliczenie poprawek uwzględniających przegłębienie ΔD_1 , ΔD_2 oraz deformacje kadłuba ΔD_f :

$$\Delta D_f = 100 \cdot TPC \cdot C_f f \quad \text{gdzie} \quad C_f = 1,027 - 0,334 \cdot \alpha$$

4. Obliczenie wyporności uwzględniającej poprawki: $D' = D_{KH} + \Delta D_1 + \Delta D_2 + \Delta D_f$
5. Uwzględnienie gęstości wody zaburtowej: $D = \frac{D'}{\rho_{KH}} \rho_a$

Schemat obliczeń *draft survey* metodą zanurzenia „średniego średnich” (metoda „japońska”)

1. Wyznaczenie zanurzenia „średniego średnich” oraz przegłębienia:

$$T_{MM} = \frac{T_D + T_R + 6T_{\otimes}}{8} \quad \text{lub} \quad T_{MM} = \frac{T_D + T_R + 4T_{\otimes}}{6} \quad t = T_D - T_R$$

2. Odczyty z danych hydrostatycznych: D_{KH} , TPC, $x_{S\otimes}$, $M_j(T_{SR} + 0,5 \text{ m})$, $M_j(T_{SR} - 0,5 \text{ m})$

3. Obliczenie poprawek uwzględniających przegłębienie $\Delta D_1, \Delta D_2$
4. Obliczenie wyporności uwzględniającej poprawki: $D' = D_{KH} + \Delta D_1 + \Delta D_2$
5. Uwzględnienie gęstości wody zaburtowej: $D = \frac{D'}{\rho_{KH}} \rho_a$

Przy wyznaczaniu masy ładunku przyjętego na statek, aby wyeliminować niedokładności określenia masy zapasów, a przede wszystkim masy konstanty, obliczenia wyporności statku wykonuje się przed załadunkiem i po załadunku, a masę ładunku wyznacza według zależności:

$$m_l = D_2 - D_1 + \Delta m_{zap} + \Delta m_{bal} + \Delta m_{różne} \quad (2)$$

gdzie:

- D_1, D_2 – masa statku przed załadunkiem i po załadunku,
- Δm_{zap} – zmiany stanu zapasów podczas załadunku statku,
- Δm_{bal} – zmiany stanu balastów podczas załadunku statku,
- $\Delta m_{różne}$ – zmiany stanu pozycji różne podczas załadunku statku.

2. PROBLEMY UWZGLĘDNIANIA DEFORMACJI KADŁUBA W OBLICZENIACH WYPORNOŚCI STATKU

Nierównomierny rozkład wzdłuż kadłuba statku ciężaru jego konstrukcji, wyposażenia, zapasów, balastu oraz ładunku względem rozkładu sił wyporu powoduje jego odkształcenie. Najczęściej występującym odkształceniem kadłuba jest wygięcie (*hogging*), natomiast rzadziej ugięcie (*sagging*). Wygięcie kadłuba jest charakterystyczne dla statków z maszynownią umiejscowioną na rufie, natomiast ugięcie dla statków z maszynownią na śródokręciu. Często jednak deformacja kadłuba jest bardziej złożona. Na dużych masowcach (z siedmioma lub większą liczbą ładowni), przy przewozie ładunków ciężkich takich jak rudy żelaza, ze względów ekonomicznych stosowany jest załadunek „naprzemienny”, tzn. ładuje się co drugą ładownię. W takiej sytuacji linia deformacji kadłuba ma więcej niż jedno ekstremum, a ponadto kadłub może być w jednej części wyginany, natomiast w innej uginany, przy czym odkształcenia są wtedy na ogół mniejsze niż w typowych stacjach ugięcia lub wygięcia [6]. W obliczeniach *draft survey* przyjmuje się jednak, że kadłub jest ugięty lub wygięty w „jednolity” sposób oraz że maksymalna deformacja występuje w płaszczyźnie owręża. Poprawność takiego podejścia zasugerowano w niektórych publikacjach, powołując się na wyniki przeprowadzonych badań [7, 9].

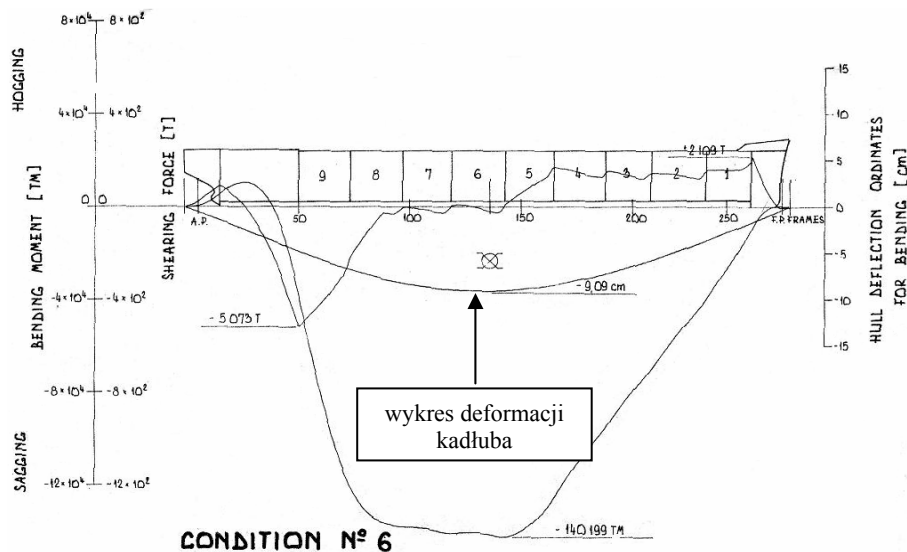
W obu opisanych wcześniej schematach *draft survey*, niezależnie od różnic w sposobie uwzględniania deformacji kadłuba, przyjęto założenia, że:

maksimum deformacji występuje w płaszczyźnie owręża

kadłub na całej długości jest wyginany lub uginany

rozkład deformacji w stronę dziobu i rufy ma charakter paraboli

Założenia te są poprawne w większości przypadków, a w szczególności w odniesieniu do statków krótkich oraz statków długich załadowanych w znacznym stopniu, na których ładunek rozmieszczony jest równomiernie we wszystkich przedziałach ładunkowych. Sytuację taką przedstawiono na rysunku 1.



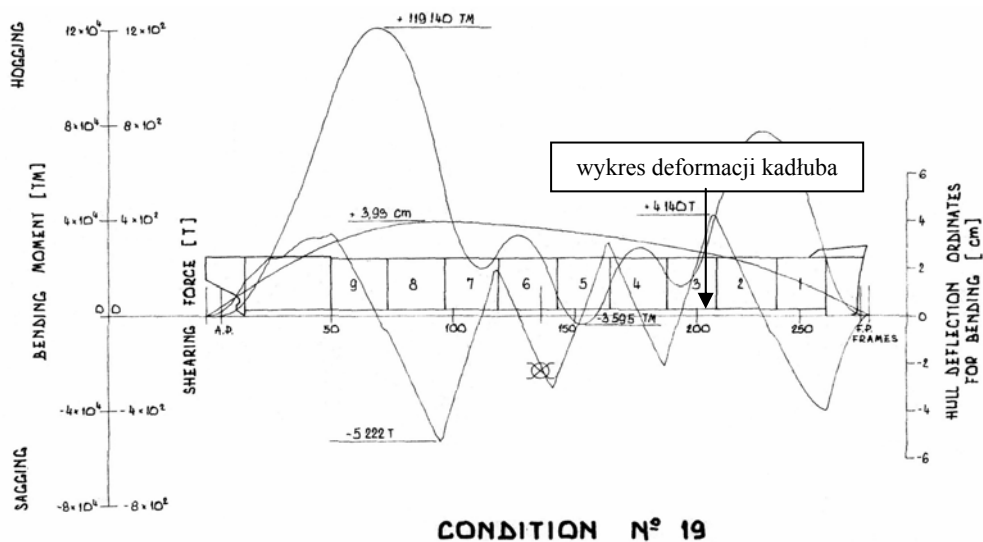
Rys. 1. Wykresy sił tnących, momentów gnących oraz deformacji kadłuba statku B525 ($L_{PP} = 236$ m)
[dokumentacja eksploatacyjna statku B525, Stocznia im. Komuny Paryskiej w Gdyni]

Jednakże w niektórych przypadkach, szczególnie na statkach długich (200 m i więcej), maksimum deformacji nie zawsze występuje na owężu, a jej rozkładu w stronę dziobu i rufy nie można aproksymować parabolą. Prezentują to wykresy na rysunkach 2 i 3. Dodatkowo na rysunku 3 można zauważyć, że względem owęża, na którym nie ma deformacji, w stronę rufy kadłub jest wyginany, a w stronę dziobu uginany. Wartości wygięcia i ugięcia nie są duże i ich wpływ na wyznaczoną masę statku jest teoretycznie znikomy (od kilku do kilkunastu ton), ale w przypadku statków o długości ponad 300 m wartości deformacji już znaczące.

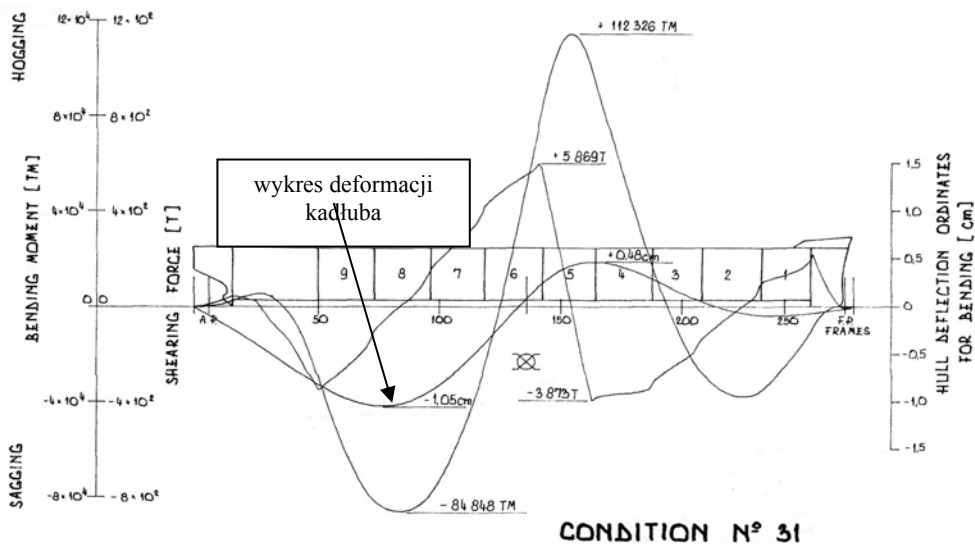
Obliczenia deformacji kadłuba y (określonej mianem strzałki ugięcia) nie są skomplikowane i wykonuje się je na podstawie zależności wiążących moment gnący Mg , moment bezwładności przekroju I oraz współczynnik proporcjonalności E (moduł Younga) [5, 6].

$$\frac{Mg}{E \cdot I} = \frac{d^2 y}{dx^2} \quad \text{skąd} \quad \frac{dy}{dx} = \frac{1}{E} \int \frac{Mg}{I} dx + a \quad (3)$$

$$y = \frac{1}{E} \frac{Mg}{I} dx \cdot dx + a \cdot x + b \quad (4)$$



Rys. 2. Wykresy sił tnących, momentów gnących oraz deformacji kadłuba statku B525 ($L_{PP} = 236\ \text{m}$) [dokumentacja eksploatacyjna statku B525, Stocznia im. Komuny Paryskiej w Gdyni]

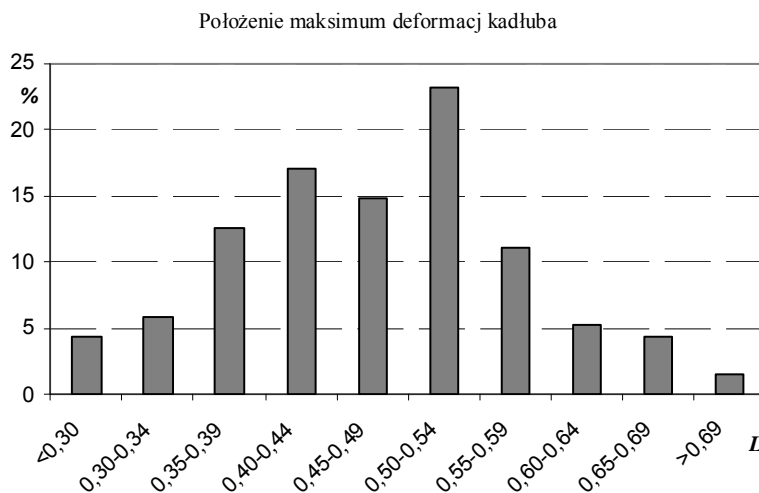


Rys. 3. Wykresy sił tnących, momentów gnących oraz deformacji kadłuba statku B525 ($L_{PP} = 236\ \text{m}$) [dokumentacja eksploatacyjna statku B525, Stocznia im. Komuny Paryskiej w Gdyni]

Wykonanie powyższych obliczeń dla różnych stanów załadowania dużej grupy statków byłoby jednak trudne w realizacji, gdyż wymagałoby zakupu dość drogiego programu liczącego wytrzymałość dowolnego kadłuba, a następnie zebrania i opracowania szeregu danych, w tym krzywej rozkładu mas statku pustego (wykres ten najczęściej nie jest umieszczany w dokumentacji statku) oraz rysunków opisujących konstrukcje kadłuba w poszczególnych jego przekrojach. Realizacja takich badań byłaby kosztowna i bardzo czasochłonna.

Można jednak skorzystać z dokumentacji eksploatacyjnych statków, do których dostęp jest dość łatwy, a w których umieszczono obliczenia wytrzymałości kadłuba wykonane przez stocznnię budującą statek. Jedyne utrudnienie stanowi to, że w większości przypadków obliczenia te ograniczają się do wyznaczenia krzywych sił tnących i momentów gnących, a tylko w niektórych zamieszczono wykresy deformacji kadłuba, takie jak przedstawione na rysunkach 1–3. Na wykresach tych można zauważyć, że maksimum deformacji występuje w przekroju bliskim temu, w którym maksimum osiąga moment gnący. Z analizy całego zgromadzonego materiału (wykresów) wynika wprawdzie, że w niektórych przypadkach przesunięcie położenia maksimum deformacji względem maksimum wykresu momentów gnących jest wyraźne i osiąga nawet $0,1 L_{PP}$ (długości między pionami), przy czym tak znaczące przesunięcie dotyczyło mniej niż 5% analizowanych przypadków.

Przyjmując założenie, że maksimum deformacji występuje w przekroju, w którym moment gnący osiąga swoje maksimum, analizie poddano wykresy momentów gnących kadłuba ponad 200 stanów załadowania wykonanych dla 6 statków (różnego typu i różnej długości). Na rysunku 4 przedstawiono uzyskany na podstawie tych wykresów rozkład występowania maksimum deformacji kadłuba w danym obszarze kadłuba, przy podziale kadłuba na sekcje o długości $0,05 L_{PP}$.



Rys. 4. Położenie maksimum deformacji na długości kadłuba (6 statków, 243 stany załadowania) [oprac. własne]

Z opracowanych danych wynika, że w 51% przypadków maksimum deformacji wystąpiło w obszarze śródokręcia w zakresie $0,45-0,54L$ i w 88% przypadków w obszarze śródokręcia w zakresie $0,40-0,60L$. Zatem w aż 12% przypadków maksimum deformacji wystąpiło poza obszarem śródokręcia (przesunięcie większe niż $0,1L$ względem owręża).

Jeżeli linia deformacji względem owręża ma mieć charakterystykę paraboli, to jej rozkład na długości kadłuba można opisać zależnością:

$$f(x) = f_{\otimes} \left[1 - \left(\frac{2x}{L_{PP}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

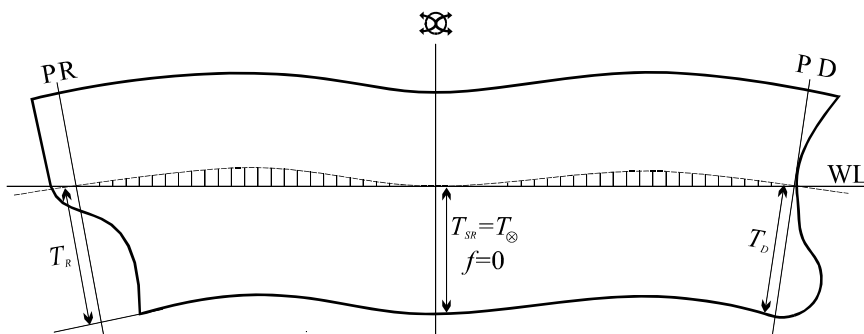
gdzie:

f_{\otimes} – wartość deformacji w płaszczyźnie owręża,

x – odległość przekroju mierzona względem płaszczyzny owręża.

Przy tak opisanym rozkładzie deformacji przesunięcie jej maksimum o $0,1L$ względem owręża, na statku o długości 300 m przy wartości deformacji 30 cm, oznaczałoby błąd pomiaru maksimum deformacji (mierzona jest dla płaszczyzny owręża) o 1,2 cm i ostateczny błąd wyznaczonej wyporności ok. $0,8TPC$.

Założenie o maksimum deformacji kadłuba występującym w płaszczyźnie owręża może prowadzić również do działań zmierzających do umyślnego zaniżenia masy ładunku przyjętego na statek. Działania takie możliwe są na statkach długich z maszynownią oraz zbiornikami z zapasami umieszczonymi na rufie. Statki takie w stanie pustym (bez ładunku) są wyginane oraz mają bardzo duże przegłębienie na rufę (nawet powyżej 5 m) i aby je zniwelować, przyjmuje się balasty w dziobowej części kadłuba. To z kolei powoduje znaczne zwiększenie momentu gnącego (zwiększa się moment wyginający kadłub) i aby go zmniejszyć, konieczne jest przyjęcie dodatkowego balastu w obszarze śródokręcia. Opisane działania są zatem w pełni uzasadnione z eksploatacyjnego punktu widzenia, prowadzą jednak do deformacji kadłuba, jak to przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Deformacja kadłuba niemożliwa do uwzględnienia przez pomiar zanurzeń na dziobie, rufie oraz śródokręciu [oprac. własne]

W układzie jak na rysunku 5, z zanurzeń pomierzonych na dziobie, rufie oraz śródokręciu wynika, że strzałka ugięcia na śródokręciu równa jest zeru, a więc nie ma deformacji. W rzeczywistości jednak wygięcia występują obszarach pomiędzy rufą i śródokręciem oraz śródokręciem i dziobem. Efektem jest zawyżona wartość wyporności statku przed rozpoczęciem załadunku – zawyżona zostaje o wielkość odpowiadającą obszarowi zakreskowanemu (rys. 5). Po odjęciu wyporności wyznaczonej dla statku przed załadunkiem od wyporności wyznaczonej dla statku po załadunku otrzyma się zaniżoną wartość masy ładunku przyjętego na statek. Nawet, jeżeli lokalne deformacje będą stosunkowo niewielkie, rzędu 4–5 cm, to i tak na statku o wyporności 200 tys. ton oznacza to zniżenie masy ładunku na poziomie 300–400 ton (ok. 2 TPC).

Inny problem stanowi wpływ deformacji na przeliczenie zanurzeń odczytanych na znakach zanurzenia na zanurzenia na pionach, które są wykorzystywane w obliczeniach *draft survey*. Jeżeli przesunięcie linii znaków względem pionów jest nieduże kształt linii deformacji ma niewielkie znaczenie, ale zdarza się, że odległość ta wynosi kilka, a czasem kilkanaście metrów. Aby uwzględnić krzywizną ugięcia kadłuba przy przeliczaniu zanurzeń ze znaków na piony, można zastosować tzw. wzory połówkowe [4]. Niestety, również te wzory zakładają, że: maksimum deformacji występuje w płaszczyźnie owręza, kadłub na całej długości jest wyginany lub uginany oraz że rozkład deformacji kształtem zbliżony jest do paraboli. Wykresy na rysunku 3 wyraźnie pokazują, że nie zawsze występuje taka sytuacja. Wśród analizowanych stanów załadowanie aż 24% nie miało jednolitego charakteru deformacji.

PODSUMOWANIE

Przedstawione problemy uwzględniania deformacji kadłuba w obliczeniach *draft survey* nie mają znaczącego wpływu na uzyskiwany wynik obliczeń, ale można spróbować je wyeliminować. Należałoby w tym celu opracować dodatkową poprawkę, analogiczną do drugiej poprawki na przegłębienie wykorzystywanej w obliczeniach *draft survey*. Zastosowanie jej będzie jednak wymagać informacji o rozkładzie deformacji wzdłuż kadłuba, a przynajmniej w obrębie śródokręcia (0,3–0,7L).

Jednym z rozwiązań, proponowanych już od jakiegoś czasu, jest umieszczenie na kadłubie dodatkowych linii znaków w połowie długości między owrężem i pionem dziobowym oraz między owrężem i pionem rufowym. Linia deformacji byłaby wtedy ustalana na podstawie pięciu przekrojów zamiast trzech.

Innym możliwym rozwiązaniem jest wykorzystanie urządzeń liczących wytrzymałość kadłuba, które powinny posiadać wszystkie statki o długości powyżej 150 m. Wprawdzie urządzenia te muszą liczyć tylko siły tnące i momenty gnące kadłuba, ale rozbudowa ich o moduł wyznaczający linię deformacji nie powinna być dużym problemem. Problem stanowi natomiast to, że statki w trakcie ich eksploatacji nabywają z czasem trwałych deformacji kadłuba i bieżąca deformacja jest wynikiem sumy deformacji aktualnego stanu załadowania i deformacji stałych.

Jeszcze innym rozwiązaniem byłoby umieszczenie, podczas budowy statku, na kadłubie (na burcie) układu „markerów” umożliwiających później, w trakcie eksploatacji jednostki, wykonanie pomiaru linii deformacji.

LITERATURA

1. *Code of uniform standards and procedures for the performance of draught surveys of coal cargoes*, UNECE – United Nations Economic Commission for Europe, 1992.
2. Dibble W.J., Mitchell P., *Draught Surveys: A Guide to Good Practice* (2nd edition), North of England P&I Association, 2009.
3. Jurdziński M., Kabaciński J., *Określanie masy ładunku na podstawie zanurzenia statku*, Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Szczecinie, Gdynia-Szczecin 2005,
4. Kabaciński J., *Wzory połowkowe*, <http://WWW.me.szczecin.pl/PDF/wzory-polowkowe.pdf>.
5. Niezgodziński M., Niezgodziński T., *Wytrzymałość materiałów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
6. Orszulok W., *Wytrzymałość kadłuba statku w eksploatacji*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1983.
7. Wesołowski R., Soliwoda J., *Obliczanie masy ładunku z pomiarów zanurzeń statku*, praca niepublikowana, Gdynia 1994.
8. Więckiewicz W., *Zanurzenia statku w czasie eksploatacji*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2004.
9. Wolfram I., *A note of correction for hog and sag*, The Naval Architect, July 1980.

THE INFLUENCE OF THE HULL DEFLECTION DISTRIBUTION THROUGHOUT THE LENGTH OF THE HULL ON CALCULATING THE SHIP DISPLACEMENT USING DRAFT SURVEY METHOD

Summary

The article presents a series of problems occurring during the ships displacement calculations, which are based on the level of the ships draughts recorded from the draughts signs - called Draft Survey. The problems are connected with the usage of the method of including the influence of the hulls deflection while paying additional regards to their distribution throughout the length of the ships hull. It shows an analysis of the location of the maximum hulls deflection which has been made basing on a series of calculations of various ships in various loading conditions. Furthermore it presents other problems with calculating the displacement of the ship that arise due to the deflection of the ships hull.