

Tentamen weerstand en voortstuwing

Vakcode: mt527 + mt518 (oud)

Datum: 30-10-2008

Tijd:

Plaats:

Opmerkingen

1. Noteer uw studienummer en naam op elk blaadje dat u inlevert.
2. Dit tentamen is gesloten boek! Geen aantekeningen of formulebladen toegestaan.
3. Beargumenteer uw rekenantwoorden: zeg even kort wat u gaat doen, en waarom.
4. Let op uw eenheden!
5. Er zijn in het totaal 4 vragen

Gegeven fysische parameters en omgevingsparameters:

Temperatuur water sleeptank: $T_s = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatuur zeewater: $T_z = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$

Soortelijke massa water sleeptank: $\rho_s = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Soortelijke massa zeewater: $\rho_z = 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Versnelling van de zwaartekracht: $g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Dampdruk bij $15 \text{ } ^\circ\text{C}$: $p_v = 1706 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Dampdruk bij $10 \text{ } ^\circ\text{C}$: $p_v = 1226 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Kinematische viscositeit sleeptank water bij $T=15 \text{ } ^\circ\text{C}$: $\nu_{fw} = 1.139 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

Kinematische viscositeit zeewater bij $T=10 \text{ } ^\circ\text{C}$: $\nu_{sw} = 1.354 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

$1 \text{ Mijl} = 1852 \text{ m}$

$1 \text{ knoop} = 1 \frac{\text{mijl}}{\text{uur}}$

Bijlagen: 2 maal diagram met open water karakteristiek B4.70 propeller

Ik wens u veel succes bij dit tentamen,

Tom van Terwisga

Vraag 1

De voorganger van de onderzeeboot is de “duikboot”, een apart soort schip dat af en toe even onder water kan, waarbij een fors snelheidsverlies optreedt. Rond 30 April 1945 vaart de eerste echte onderzeeër uit die wel geoptimaliseerd is voor het varen onder water en haalt daar ook een hogere snelheid. Deze schepen zijn 76,6 m lang met een waterverplaatsing (onder water) van 2,100 ton. Een serie accu’s en electromotoren leveren een vermogen aan de schroef van totaal 3240 kW.



Uw tentamen onderwerp is vandaag de dag nog te bewonderen in Bremerhaven. De cavitatie tunnel is als oorlogsbuit meegenomen naar University of Newcastle upon Tyne.

a) Bij het testen van modellen van normale schepen om de *weerstand* en de *gevraagde stuwkracht* te bepalen wordt er gebruik van een aantal schaalregels. Wat zijn deze schaalregels en geef een fysische interpretatie. Deze schaalregels gebruikt men voor het bepalen van de modelsnelheid. Leg uit hoe dit in zijn werk gaat.

3 punten

b) Zou u deze schaalregels ook toepassen voor het testen van onderzeeërs die zeer ver onder het wateroppervlak varen?

2 punten

c) Wat weet u van de weerstandskarakteristiek van een onderzeeboot in ver ondergedompeelde toestand? Omschrijf hoe u met deze kennis de vormfactor van de onderzeeboot aan de hand van modelproeven in ver ondergedompeelde toestand kunt bepalen.

3 punten

d) Hoe ziet de weerstandskarakteristiek van een onderzeeboot model eruit in ver ondergedompeelde toestand in een wrijvingsloze vloeistof?

2 punten

Antwoorden

a. Bij het doen van modelproeven moet in principe voldaan worden aan de drie gelijkvormigheidswetten: geometrische, kinematische en dynamische gelijkvormigheid.

Deze wetten geven de verhoudingen tussen gelijke grootheden, zoals bijvoorbeeld de schroefdiameter/scheeps lengte verhouding (geometrische), de voortgangscoefficient van schroeven (kinematische: $J = \frac{V_a}{nD}$, waarmee de verhouding aanstroomsnelheid,

omtreksnelheid bepaald is) en dynamische, bijv. het Froude en het Reynolds getal. Wat betreft de dynamische gelijkvormigheid moet voldaan worden aan identiteit van het Froude getal bij model en full scale, als ook aan het Reynolds getal. Het Froude getal geeft de verhouding van massatraagheidskrachten tot zwaartekracht aan in de stroming, het Reynoldsgetal geeft de verhouding tussen massatraagheidskrachten en visceuze krachten aan:

$$Fn = \frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{V_s}{\sqrt{gL_s}}$$

waarbij de subscript m en s refereren aan “model”, respectievelijk “ship”.

Evenzo voor Rn:

$$Rn = \frac{V_m L_m}{\nu_m} = \frac{V_s L_s}{\nu_s}$$

Uit beide gelijkvormigheidswetten kunnen we nu de verhouding tussen modelsnelheid / full scale ship snelheid afleiden.

$$\text{Volgens Froude: } \frac{V_m}{V_s} = \sqrt{\frac{L_m}{L_s}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$$

$$\text{waarbij } \lambda = \frac{L_s}{L_m}$$

$$\text{Volgens Reynolds Rn: } \frac{V_m}{V_s} = \frac{\nu_m L_s}{\nu_s L_m} \approx \lambda$$

Aan beide gelijkvormigheidswetten kan dus alleen voldaan worden als $\lambda = 1$. In de praktijk houden we de schaalwet van Froude aan, en wijken we af van de Reynolds gelijkvormigheid. Dit betekent dat we de golfmakende weerstand goed omschalen zonder schaalearde effecten te introduceren. Schaalearde effecten worden dus wel geïntroduceerd bij de verscaling van visceuze krachten, omdat we niet voldoen aan de Reynolds schaalregel. Hiervoor wordt echter gecorrigeerd door gebruik te maken van de bekende relatie tussen de vlakke plaat wrijvingsweerstandscoefficient C_F en de dimensieloze snelheid Rn (via bijv. ITTC '57 wrijvingslijn).

- b. Omdat een onderzeer die ver onder water vaart geen golven en dus geen golfmakende weerstand produceert, hoeven we niet te voldoen aan de schaalwet van Froude en kunnen we dus bij een hogere modelsnelheid varen, die dicht bij het “full scale” Rn getal ligt.
- c. Een onderzeeboot die recht uit vaart ondervindt hoofdzakelijk wrijvingsweerstand en visceuze drukweerstand: $R_T = R_F + R_{vp} = R_F (1+k)$

Bij schaalafhankelijke ligging van het loslatingspunt van de grenslaag, zijn beide weerstandscomponenten ongeveer evenredig met het kwadraat van de snelheid:

$$R_F (1+k) = cV^2$$

De wrijvingsweerstand kunnen we bepalen aan de hand van de bekende weerstandscoefficient voor een vlakke plaat voor het Rn waarvoor de weerstand van het schip zoeken. Als we dus de totale weerstand meten, en we berekenen de vlakke plaat wrijvingsweerstand, dan kunnen we uit de eerste formule de vormfactor $1+k$ berekenen. Als we meerdere punten meten, kunnen we de vormfactor ook bepalen uit de tweede formule, omdat we dan de factor voor de constante c kunnen afleiden.

- d. In ver ondergedompelde toestand, in een wrijvingsloos medium is de weerstand van de onderzeeboot gelijk aan nul (Paradox van d' Alembert). Meer volledig zou zijn dat we nog eisen dat de stroming rotatievrij is en dus een potentiaalstroming is, waarvoor de paradox van d' Alembert is afgeleid.

Vraag 2

a) De onderzeeboot uit vraag 1 heeft bij 5 knoop (ware grootte) een weerstand van 18.98 kN (onderwater). Als de onderzeeër op maximum vermogen gaat varen, bij welke P/D haalt de dubbelschroefs onderzeeër de maximale snelheid? Gegeven is dat het toerental 300 rpm is en de diameter van de schroeven 2m. Voor het volgstroomgetal en zoggetal neemt u 0,15 respectievelijk 0,1. Gebruikt het meegeleverde B4-70 schroefdiagram¹. Geef naast (historisch correcte) maximum snelheid zowel J en P/D.

Hint: we zijn nu niet op zoek naar het optimum rendement!

4 punten

b) Teken in het schroefdiagram het ideale schroefrendement behorende bij de schroef met een P/D=1,4. Schrijf hiervoor eerst het ideale rendement als functie van J en K_T . Het ideaal rendement is hieronder gegeven als functie van C_T :

De generieke vorm van het ideaal rendement voor een schroef in een straalbuis is:

$$\eta_i = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \tau C_T}} ,$$

waarbij τ = stuwkrachtsverhouding $\frac{T_p}{T}$ (stuwkracht propeller / totale stuwkracht) en C_T

de stuwkracht coefficient.

2 punten

c) Welke verliestermen in de schroefomstroming kunt u bedenken, die niet gemodelleerd zijn in het ideaal rendement?

2 punten

d) Waar wijkt het ideëel rendement het meest af van het open water rendement? Geef hiervoor een uitgebreide verklaring.

2 punten

Antwoorden

a. Gevraagd wordt de snelheid van het schip V_s .

Gegeven n, D

P_D , R_T (bij 5 kn., maar deze kan dus voor een willekeurige snelheid bepaald worden - zie vraag 1c)

w, t

We kunnen nu dus zowel de door het schip gevraagde koppelcoefficient als ook de stuwkrachtscoefficient van de schroef bepalen. Bij deze combinatie van koppel en stuwkrachtcoefficient kunnen we vervolgens de spoedverhouding P/D bepalen, waarbij de schroef deze combinatie levert. Dit kunnen we bijvoorbeeld doen door voor de gevraagde koppelcoefficient, voor elke P/D verhouding de bijbehorende stuwkrachtcoefficient te bepalen. We kunnen dan deze K_t capability van de schroef aansnijden met de K_t demand van het schip, waaruit de P/D verhouding volgt. Zie spreadsheet.

¹ We zijn op de hoogte van het feit dat de Wageningen B-serie in 1945 nog niet bestond en dat de bewuste onderzeeër een paar drie-blads schroeven heeft.

Tentamen mt527 30 Okt 08					
vraag 2a					
Pd	[kW]	3240			
n	[rpm]	300	[1/s]	5	
D	[m]	2			
Vs	[kn]	5	m/s	2.5722	
R	[kN]	18.98			
T	[kN]	21.08889			
C_T	[-]	1.370038			
Kt/J^2	[-]	0.538013			
t		0.1			
w		0.15			
Dubbel Schroef schip					
Pd per schroef		1620			
Km		0.062886			
10 Km		0.628856			
P/D	J	Kt	Kt/J^2		
	1.4	0.88	0.28	0.36157	
	1.3	0.735	0.31	0.573835	
	1.2	0.54	0.345	1.183128	
		0.75		0.5424	
J		0.75			
Va		7.5			
Vs		8.82 m/s			
		17.15 kn			

Antwoord: Vs= ca. 17.15 kn
 J=0.75, P/D ca. 1.3

- b. Voor een schroef zonder straalbuis is $\tau = 0$.

$$C_T = \frac{8K_T}{\pi J^2}$$

$$\eta_i = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}}}$$

Compute the η_i for a few J values for the P/D propeller = 1.4 and find the ideal efficiency curve.

- c. Verliestermen in het ideaal rendement die niet gemodelleerd zijn:
- zijn visceuze verliezen t.g.v. de wrijving langs de schroefbladen
 - rotatie verliezen t.g.v. tangentiële snelheden in het zog, of t.g.v. geïnduceerde weerstand op het blad als gevolg van de eindige aspect verhouding
 - verliezen t.g.v. de niet uniforme snelheidsverdeling a.g.v. het eindige aantal bladen en de niet uniforme belastingsverdeling over de schroefschijf.
- d. The simple relation loses its validity for the light propeller loadings, high J-values, because here the viscous drag and torque become more pronounced, which are not modelled in the actuator disk theory.

Vraag 3

a) Op de schroef vind men een minimum druk met een $C_p = -8$ (op hart as). Het zeewater is 15° en heeft een atmosferische druk van 1 bar. Als de onderzeeër op 10 meter diepgang gaat varen, bij welke snelheid verwacht u dan cavitatie inceptie?

2 punten

b) Omdat cavitatie testen rond 1940 nog niet geheel standaard zijn is er onduidelijkheid over het schalen van een cavitatie proef; kan men naar een hoog Reynolds getal gaan omdat er geen vrij vloeistof oppervlak is, of moet men de snelheid in de cavitatie tunnel schalen met Froude? Bespreek de voordelen en de nadelen van beide keuzes.

3 punten

c) Tijdens modelproeven blijkt dat de propeller erg last heeft van vliescavitatie. Geef aan wat deze condities naar alle waarschijnlijkheid zijn geweest.

2 punten

d) Kunt u dan een aantal maatregelen noemen om dit te verminderen?

3 punten

Antwoorden

a. Voor cavitatie inceptie (het moment waarop de schroef begint te caviteren), nemen we

$$\text{aan dat } p = p_v. \text{ Hieruit volgt dat } \sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} = -C_p$$

$$\text{waarbij } p = p_{atm} + \rho gh$$

Substitutie levert een snelheid van $V = 13.5 \text{ kn}$.

b. Uitschrijven van het cavitatie getal levert:

$$\sigma = \frac{p_{atm} + \rho gh - p_v}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

Het verloop van het cavitatie getal over de propeller diameter moet schaal onafhankelijk zijn. Is dit niet het geval, dan zal de cavitatie conditie voor elke hoogtepositie anders zijn. Hieraan wordt alleen voldaan als $\Delta\sigma$ over de propeller diameter onafhankelijk is van de

schaalfactor λ . Dit betekent dat $\frac{\rho gh}{\frac{1}{2} \rho V^2}$ schaalonafhankelijk moet zijn. Dit is alleen het

$$\text{geval als geldt: } V_m^2 = \frac{V_s^2}{\lambda} \text{ omdat } h_m = \frac{h_s}{\lambda}$$

c. Relatief zwaar belaste propeller bij relatief lage cavitatiegetal getest. Dit betekent dat de onderzeeboot dicht bij het oppervlak gevaren heeft (lage bijdrage hydrostatische druk term) met hoge snelheid. De propeller belasting wordt dan ook nog eens hoger door de bijdrage van de golfmakende weerstand aan de schroefbelasting C_T .

d. Maatregelen om dit te verminderen zijn dus belasting omlaag of cav. getal omhoog:

a. dieper gaan varen (geen golfmakende weerstand)

b. grotere prop. diameter

c. lagere snelheid

Op het niveau van de schroefgeometrie kunnen nog maatregelen genomen worden om de drukverdeling op het schroefblad vlakker te maken (dus voorkomen van zuigpiek t.p.v. de Leading Edge van het blad. Ik verwacht echter niet dat deze detailmaatregelen genoemd worden.

Vraag 4

U wordt gevraagd een evaluatie van het schroefontwerp voor deze onderzeeboot te maken. Om te testen of u de juiste persoon bent om deze vraag aan voor te leggen, stelt de opdrachtgever u even een paar oriënterende vragen:

- a) Welke criteria gebruikt u voor de keuze van het aantal bladen, het bladoppervlak, de diameter en de spoedverhouding?
3 punten
- b) Welke vormen van cavitatie kent u, en kunt u per vorm, aangeven of ze hinderlijk zijn of niet?
3 punten
- c) Uw opdrachtgever beweert dat bij de zgn “bollard pull” conditie, het rendement van de propeller gelijk is aan 0, en de propeller dus geen stuwkracht levert. Bent u hiermee eens. Beargumenteer waarom wel of niet. Is er een manier om de prestaties van de propeller bij $V=0$ te kwantificeren?
4 punten

Antwoorden:

- a. De volgende criteria worden gebruikt:
- Criterion voor keuze aantal bladen: De bladfrequenties die ontstaan door het draaien van de schroef in een onregelmatig volgstroomveld mogen niet samenvallen met de cylinder frequenties van de motor en niet met duidelijke harmonische componenten uit het volgstroomveld. M.a.w. de schroefblad frequenties mogen niet samenvallen met andere excitatie frequenties in het propeller-schip-motor systeem
 - Het bladoppervlak moet voldoende groot zijn om cavitatie problemen zoals te grote drukfluctuaties of cav. erosie te voorkomen.
 - De diameter moet zo groot mogelijk zijn voor het hoogste rendement bij nog te kiezen motor. Bij reeds gekozen motor, kan de optimale diameter iets kleiner zijn.
 - De spoedverhouding wordt zodanig gekozen dat de schroef in het ontwerp punt het maximale overall rendement vertoond.
- b. Je kunt de volgende types noemen. Bij 3 genoemde vormen met hun goede typering van hinder krijgt u het volle aantal punten
- bellencavitatie - wordt in principe vermeden vanwege het risico voor vliescavitatie. Er woedt nog een debat of het werkelijk (altijd) erosie risico's met zich meebrengt.
 - vliescavitatie of sheet cavitatie – mits stabiel en afgevoerd wordt in een caviterende tipwervel is het in principe niet een schadelijke vorm van cavitatie. Wanneer het echter opbreekt in wolkencavitatie die dicht bij het oppervlak in de buurt zit, kan het zeer schadelijk zijn.
 - tipwervelcavitatie. Mits deze vorm van cavitatie niet opbreekt in de buurt van schroefblad of roer, is deze vorm van cavitatie niet erg schadelijk. Het produceert vooral hoger frequente trillingen en geluid. Wanneer het wel opbreekt in de buurt van een materiaal oppervlak, kan het zeer erosief zijn.
 - bladwortel cavitatie. Treedt op bij de bladwortel. Ontstaat meestal uit vliescavitatie en/of wervelcavitatie. Kan zeer erosief zijn als het opbreekt.
 - Propeller-Hull-Vortex cavitatie: PHV cavitatie. Zeer agressieve vorm van cavitatie die ontstaat bij een relatief zwaar belaste schroef met een lage instroomsnelheid. Kan trillingen, lawaai en ernstige schade veroorzaken.
- Per goed benoemde vorm 1 punt.

- c. De bollard pull conditie is een bijzondere conditie doordat $J=0$ a.g.v. de $V=0$. Hierdoor wordt het openwater rendement ook gelijk aan 0: $\eta_o = \frac{K_T}{K_Q} \frac{J}{2\pi}$. Er wordt echter wel stuwkracht geleverd door de schroef, immers K_T is maximaal bij $J=0$. De prestaties van de propeller bij $J=0$ kunnen gekwantificeerd worden door de zgn. Quality Index:
- Quality Index $QI = \frac{\eta_o}{\eta_i}$. Wanneer je dit uitschrijft (hier niet nodig), verdwijnt de voortgangscoefficient J uit de noemer, en krijgt de QI een eindige waarde. Het is een maat voor de verliezen t.o.v. de axiale kinetische energie verliezen die in het ideaal rendement η_i verrekend zijn.