

Stromingsgeïnduceerde trillingen in warmtewisselaars

Citation for published version (APA):

Campen, van, D. H., & Hoogt, van der, P. J. M. (1984). Stromingsgeïnduceerde trillingen in warmtewisselaars. *Constructeur*, 23(4), 20-25.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1984

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Stromingsgeïnduceerde trillingen in warmtewisselaars

Bij het ontwerpen van apparaten, waarin warmte wordt uitgewisseld zoals verdampers, overhitters, luchtverhitters, condensors, etcetera wordt een dynamische analyse van de pijpenbundels in het algemeen van secundair belang geacht en krijgt daarom vaak geen of summier aandacht. Een tweetal argumenten zou hieraan ten grondslag kunnen liggen:

- het betreffende constructiedeel heeft meestal geen dragende functie, zodat tijdens de ontwerpfase prioriteit gegeven wordt aan optimale warmte-overdrachtseigenschappen
- vanwege de grote diversiteit aan mechanismen die aanleiding kunnen geven tot instabiel gedrag in een warmtewisselaar is een verantwoorde classificatie van mogelijk optredende fenomenen, die tot een eventueel falen van de component kunnen leiden een lastige en vaak arbeidsintensieve bezigheid. Ontwerpregels (indien aanwezig) beperken zich meestal tot het voorkomen van akoestische resonantie in kanalen, waarbij zelden rekening gehouden wordt met belangrijke interactie-effecten tussen de 'vaste stof' en het stromende medium.

Het is dan ook niet verwonderlijk dat optredende problemen in warmtewisselaars, zoals beschadiging van de pijpen ten gevolge van onderling contact, slijtage (Engels: fretting) van de ondersteuning en schade door vermoeiingsscheuren vaak worden veroorzaakt door ongeoorloofde trillingen, waarvan het mechanisme tijdens de ontwerpfase niet werd onderkend.

Een bijkomend probleem is het feit dat ontoelaatbare trillingen tijdens bedrijf moeilijk te detecteren zijn, omdat het falen van een klein constructiedeel (bij voorbeeld een pijp of verbindingstrip) geen merkbaar vermogensverlies teweeg brengt. Het gevolg is dan ook dat de schade zich, vaak cumulatief, kan uitbreiden over een groot deel van de component alvorens wordt ingegrepen.

Het behoeft geen betoog, dat het buiten bedrijf stellen van met name nucleaire, maar ook conventionele energie-installaties een geldverslindende fase inluidt, tijdens welke een analyse dient plaats te vinden van de te nemen voorzorgsmaatregelen, en reparatiewerkzaamheden moeten worden uitgevoerd.

Daar er een intensieve wisselwerking aanwezig is tussen gas- en/of vloeistofstroming en vaak buigslappe constructiedelen van een warmtewisselaar, ligt het voor de hand dat het stromende medium als initiator fungeert voor mogelijk instabiel gedrag van deze delen. Een deelgebied van de technische mechanica dat tracht deze wisselwerking te beschrijven vormt de zogenaamde 'stromingsgeïnduceerde trillingen'. Dit deelgebied is in feite een onderdeel van het grotere gebied der dynamica en mechanische trillingen, terwijl een sterke interactie met de stromingsmechanica optreedt.

In dit artikel wordt uit het gebied van de stromingsgeïnduceerde trillingen een aantal aspecten behandeld, dat deel uitmaakt van een onderzoeksproject binnen de vakgroep Grondslagen der Technische Hogeschool Twente, in nauwe samenwerking met Stork-Ketels-Hengelo (MESK). Speciale aandacht wordt besteed aan hydrodynamische koppelingseffecten, die optreden bij in dwars- en langsricting aangestroomde configuraties rechte parallelle pijpen en de invloed van deze effecten op het trillingsgedrag van het beschouwde systeem.

SYMBOLENLIJST

Voor de p-de pijp:

m_p	massa per lengte-eenheid
E_p	elasticiteitsmodulus
I_p	traagheidsmoment
A_p	oppervlak dwarsdoorsnede
O_p	manteloppervlak
R_p	buitenstraal
u_p, v_p	verplaatsingen
U_p^p, V_p^p	amplitudecoëfficiënten
X_p^p	r-de balkfunctie
x_p	langskoördinaat
Φ^p	snelheidspotentiaal

Dimensieloze grootheden voor identieke pijpen:

$$u = UL (Q_L A / EI)^{1/2}$$

$$\Omega = \omega L_2 [(m + Q_L A) / EI]^{1/2}$$

$$\beta = Q_L A / (m + Q_L A)$$

Voor de bundel:

Z_{pk}	hartafstand pijp p tot pijp k
Ψ_{pk}	oriëntatiehoek pijp p tot pijp k
L	pijplengte
ω	eigenfrequentie (rad/s)
f	eigenfrequentie (1/s)
Q_L	dichtheid van het medium
M	aantal balkfuncties
U	aanstroomsnelheid

Zelfgeïnduceerde en gedwongen trillingen

Het stromende medium en de constructie zijn dynamisch interactieve systemen. Beide systemen zijn gekoppeld door de kracht die de stroming op de vaste stof uitoefent.

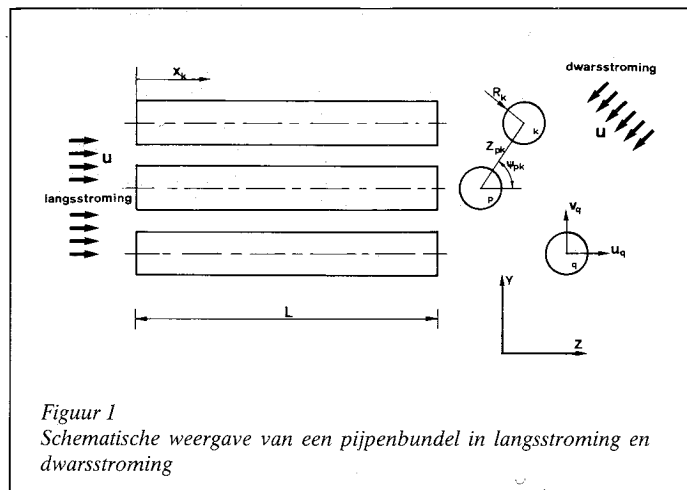
Zoals bekend uit de leer van de mechanische trillingen is de periodiciteit van de op een systeem werkende krachten samen met het dissipatieve vermogen (damping) en het eigenfrequentiespectrum van het systeem, verantwoordelijk voor het al dan niet optreden van resonantie. Bij een trillingsanalyse van omstroomde pijpenbundels wordt met betrekking tot het ontstaan van periodiek tijdsafhankelijke krachten onderscheid gemaakt tussen twee trillingsmechanismen. Indien de fluctuaties in de stroming van externe (niet systeemgebonden) oorsprong zijn, zoals bij voorbeeld verstoringen in de stroming ten gevolge van de aanwezigheid van een klep, meetflens of pompfluctuaties, dan spreekt men van (harmonisch) gedwongen trillingen. Dit in tegenstelling tot de zogenaamde zelfgeïnduceerde trillingen, die ontstaan door veranderingen van de oorspronkelijke positie van de vaste stof ten opzichte van het stromende medium. De krachtfluctuaties vinden in dit geval hun oorsprong in deze positieveranderingen en zijn dus systeemgebonden. De diverse vormen van flutter van vliegtuigvleugels en het lijndansen (Engels: galloping) van bejzelde hoogspanningsdraden zijn verwante fenomenen, die onder dit laatste mechanisme te rangschikken zijn [1].

Aan de hand van een rekenmodel voor de beschrijving van het trillingsgedrag van pijpenbundels in langsstroming en dwarsstroming zal nader worden ingegaan op de invloed van de stroming op het frequentiespectrum en de stabiliteit van het systeem.

De modelvorming

Een analyse van het trillingsgedrag van pijpenbundels omgeven door een stromend medium vereist het oplossen van een stelsel gekoppelde algebraïsche vergelijkingen. De koppeling tussen de pijpen wordt verzorgd door het drukveld in het medium. Dit drukveld manifesteert zich door een resulterende kracht ter plaatse van het manteloppervlak van iedere afzonderlijke pijp.

In figuur 1 is een verzameling willekeurig gegroepeerde cirkelcilinders weergegeven. Elke cilinderpijp kan een trilling om zijn evenwichtsstand uitvoeren. De verplaatsing van een cilinderdoorsnede ten opzichte van deze evenwichtsstand wordt ontbonden in twee orthogonale componenten, evenwijdig aan een globaal Y-Z-assenstelsel. Op deze wijze zijn we in staat om de (gekoppelde) trillingsvormen van de bundels als geheel in het vlak van een willekeurig dwarsdoorsnede te beschrijven. Bovendien wordt met de systeemparameters Z_{pk} en ψ_{pk} de ligging van de cilinders ten opzichte van dit assenstelsel gefixeerd.



Figuur 1
Schematische weergave van een pijpenbundel in langsstroming en dwarsstroming

Potentiaalformulering

In veel gevallen kan de stroming als rotatievrij en niet visceus worden opgevat. Bovendien kunnen compressibiliteitseffecten in het medium voor de in de praktijk geldende stroomsnelheden vaak verwaarloosd worden.

De snelheidspotentiaal Φ^p voldoet dan aan de Laplace vergelijking

$$\Delta \Phi^p = 0 \quad (1)$$

waarbij, gezien de geometrie van de pijpen, een formulering van (1) in poolcoördinaten of cilindercoördinaten de voorkeur geniet. De (totale) snelheidspotentiaal wordt opgesplitst in een aantal deelpotentialen. Elke deelpotentiaal is in eerste instantie betrokken op de lokale coördinaten van een voor elk der potentialen verschillende pijp.

De constructie van Φ^p in een twee- of driedimensionale formulering vereist het transformeren van deze deelpotentialen naar de lokale coördinaten van elke afzonderlijke pijp van de bundel. Vervolgens levert sommatie van deze deelpotentialen een uitdrukking voor de totale potentiaal Φ^p van de betreffende pijp p. Voor een uitgebreide beschouwing over de afleiding van de functie Φ^p wordt verwezen naar [3, 4, 5].

De axiale afhankelijkheid

Tot dusverre speelde de beschouwing over de modelvorming zich af in een willekeurig dwarsdoorsnede van de bundel en werd er geen uitspraak gedaan over de afhankelijkheid van de pijpen met betrekking tot de langscoördinaten x_p . De exacte oplossing is op voorhand niet te geven, maar kan willekeurig dicht benaderd worden door een reeks functies. Elke functie dient evenwel de geometrische randcondities van de uiteinden van de pijpen te kunnen weergeven.

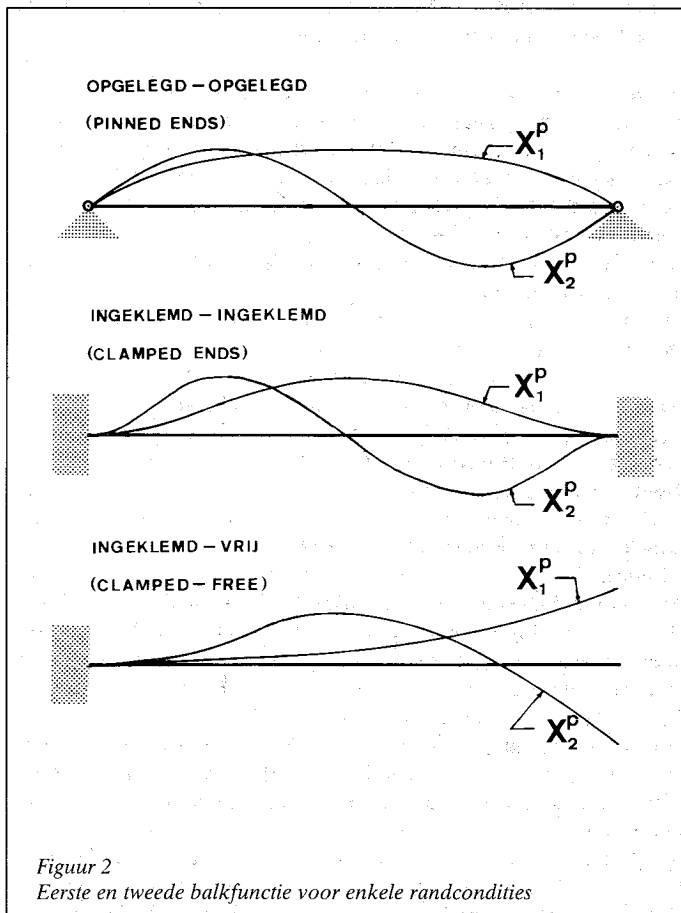
Een aantrekkelijke keuze zijn de zogenaamde balkfuncties^{*)}, die het vrij transversaal trillende gedrag van een op zuivere buiging belaste balk beschrijven (figuur 2). Voor de verplaatsingen u_p en v_p kan dan genoteerd worden:

$$u_p = \sum_{r=1}^M U_r^p X_r^p(x_p) e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$v_p = \sum_{r=1}^M V_r^p X_r^p(x_p) e^{i\omega t} \quad (3)$$

Elke balkfunctie X_r^p wordt vermenigvuldigd met een bijbehorende (maar nog onbekende) amplitudecoëfficiënt U_r^p en V_r^p voor de verplaatsing in de Y-respectievelijk Z-richting en met een tijdsafhankelijke term, waarin de (in het algemeen complexe) grootte ω de nog onbekende cirkelfrequentie van het systeem voorstelt.

De waarde van M legt het aantal benaderingstermen vast dat in de berekening wordt meegenomen. Deze waarde is afhankelijk van de mate van convergentie van de oplossing.



Figuur 2
Eerste en tweede balkfunctie voor enkele randcondities

^{*)} De balkfuncties bieden rekentechnische voordelen in verband met onderlinge orthogonaliteitsrelaties [2]. Bovendien kan een snelle convergentie worden verwacht, omdat deze functies de natuurlijke trillingsvormen van de pijpen het dichtst benaderen.

Stromingsgeïnduceerde trillingen in warmtewisselaars

De drukkrachten

Uit het drukveld van het stromende medium om de bundel en de drukverstoring ten gevolge van de trillingen van de pijpen om hun evenwichtsstand kan na integratie over elk manteloppervlak O_p de resulterende kracht werkzaam op dit oppervlak worden bepaald:

$$F_p = \int O_p - \rho_L \left(\frac{\partial \Phi^p}{\partial t} = \frac{1}{2} \nabla \Phi^p \cdot \nabla \Phi^p \right) dO_p \quad (4)$$

De integrand van (4) beschrijft de druk ter plaatse van pijp p in termen van de snelheidspotential Φ^p .

De virtuele arbeid

Vergelijking (4) vormt het uitgangspunt voor de beschrijving van de onderlinge interactie van de pijpen ten gevolge van de aanwezigheid van het stromende medium. Een energiebeschouwing gebaseerd op het principe van virtuele arbeid van het systeem vereist het in rekening brengen van de arbeid verricht door de krachten F_p , waardoor een koppeling tussen de afzonderlijke pijpen tot stand wordt gebracht. Indien we uitgaan van een stationaire aanstroming en niet-lineaire effecten buiten beschouwing laten (kleine uitwijkingen ten opzichte van de evenwichtsstand), resulteert deze energiebeschouwing in een stelsel homogene algebraïsche vergelijkingen, dat als volgt in vectorvorm kan worden samengevat:

$$(S + i\omega D - \omega^2 M) \bar{V} = \bar{O} \quad (5)$$

De massamatrix M , de dempingsmatrix D en de stijfheidsmatrix S verzorgen de koppeling tussen de pijpen. Naast de 'vaste stof' grootheden, zoals massa en buigstijfheid der pijpen, bevatten zij additionele termen, die functies zijn van de geometrie van de bundel (steek, rangschikking en diameter) en van de hydrodynamische grootheden (ongestoorde snelheid en dichtheid). Op deze additionele effecten wordt in de volgende paragrafen nader ingegaan. De vector \bar{V} bevat de amplitude-coëfficiënten voor elke pijp van de bundel. Met deze coëfficiënten worden de trillingsvormen behorende bij een bepaalde waarde van ω in een dwarsdoorsnede van de bundel beschreven.

Oplossen van het (complexe) eigenwaardeprobleem (5) levert in het algemeen complexe waarden voor de frequentie ω en de componenten van \bar{V} . Instabiel gedrag treedt op wanneer $Im(\omega) < 0$. In dat geval kunnen de verplaatsingen u_p en v_p 'onbeperkt' toenemen (vergelijkingen (2) en (3)). Deze dynamische instabiliteit wordt flutter genoemd.

Een bijzonder geval doet zich voor indien de additionele termen in de stijfheidsmatrix S de buigstijfheid compenseren: de frequentie ω nadert naar nul en er treedt buckling (knik) op.

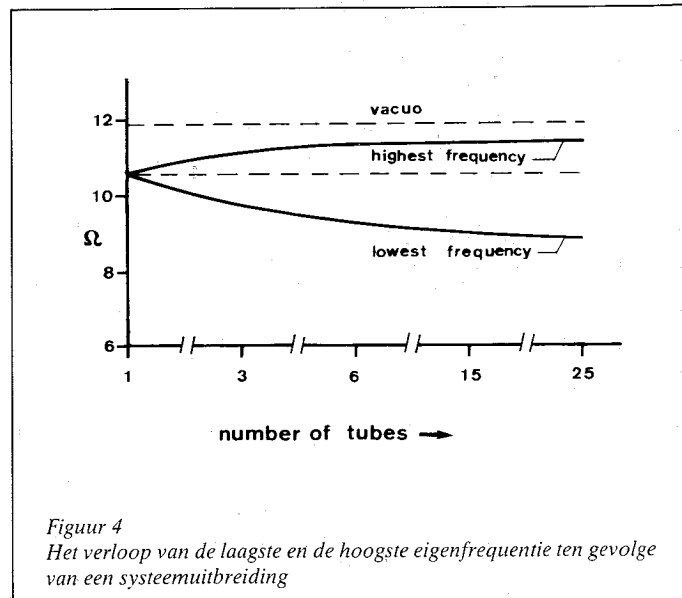
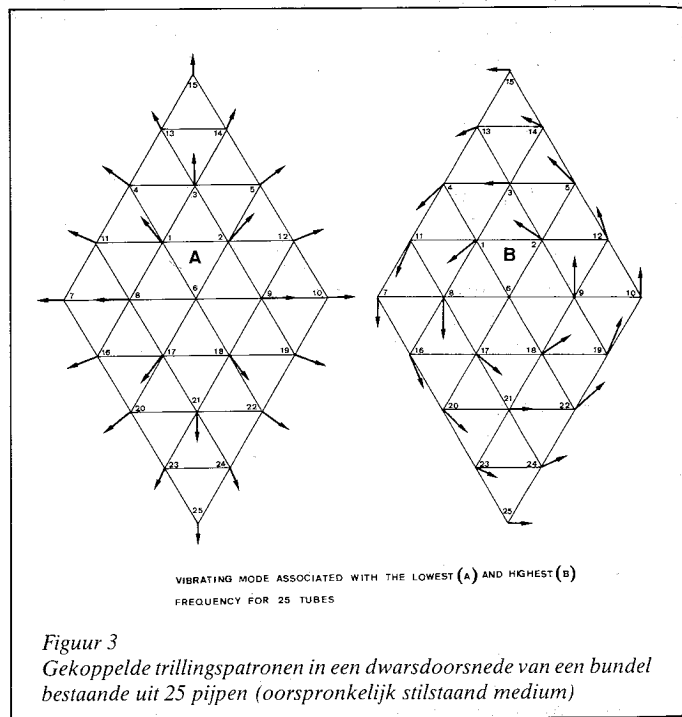
De invloed van de toegevoegde massa

De trillingen van de pijpen om hun evenwichtsstand veroorzaken een drukverstoring in het medium. Ter plaatse van de manteloppervlakken manifesteert zich deze verstoring in een extra massa-

term: de toegevoegde massa (Engels: added mass). Met name bij compacte bundels en media met hoge dichtheid (vloeistoffen) veroorzaakt de toegevoegde massa een aanmerkelijke reductie van het frequentiespectrum.

De invloed van de toegevoegde massa kan het beste toegelicht worden aan de hand van het vrije trillingsgedrag van een bundel in een oorspronkelijk in rust verkerend medium (dus geen aanstroomsnelheid). Figuur 3 toont de gekoppelde trillingspatronen van een configuratie bestaande uit 25 pijpen behorende bij de laagste en de hoogste eigenfrequentie. Om na te gaan wat het gedrag is van beide frequenties bij een toename van het aantal pijpen in een bundel, werd de configuratie van figuur 3 stapsgewijs opgebouwd. Uitgaande van één pijp werd het systeem uitgebreid met:

- 3 pijpen (driehoek 1-2-3)
- 6 pijpen (driehoek 4-5-6)
- 15 pijpen (driehoek 7-10-15)
- 25 pijpen (ruit 7-15-10-25).



In figuur 4 zijn de hoogste en de laagste eigenfrequentie weergegeven als functie van deze systeemuitbreiding. We zien, dat beide frequenties naar een constante waarde convergeren. Blijkbaar kan men voor de analyse van het vrije trillingsgedrag volstaan met het beschouwen van een beperkt aantal pijpen in de bundel. Dit aantal is afhankelijk van de rangschikking en de spatiëring van de pijpen [4].

Langsstroming

Indien de aanstroming van de bundel evenwijdig aan de lengte-assen van de pijpen geschiedt, spreken we van langsstroming (Engels: axial flow). Voor de dynamische analyse van bundels in langsstroming is het zelfgeïnduceerde trillingsmechanisme, zoals voorheen beschreven, van belang: immers ten gevolge van de (periodieke) uitbuiging van de pijpen in vlakken loodrecht op de aanstroomrichting zullen er (periodieke) krachtencomponenten van de stroming op de manteloppervlakken van de pijpen werkzaam zijn. Deze componenten zijn afhankelijk van de verplaatsing en de snelheid van de pijpen en zijn dus systeemgebonden.

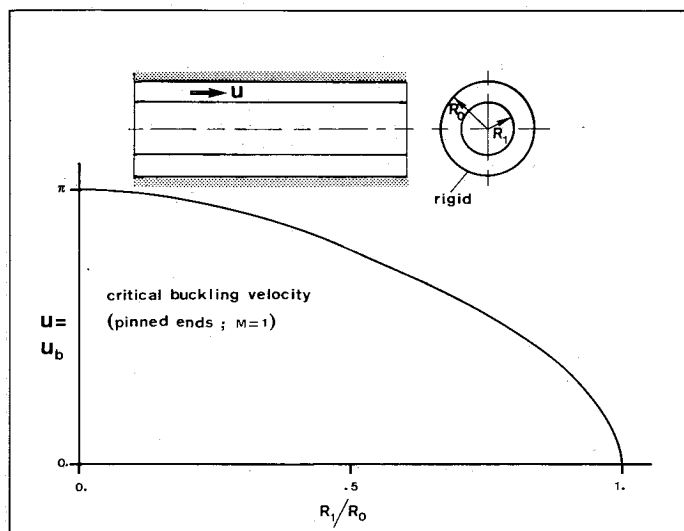
Bij een energiebeschouwing van het systeem komt de plaatsafhankelijkheid tot uiting in een zogenaamde toegevoegde stijfheid (Engels: added stiffness), terwijl de snelheidsafhankelijkheid een

toegevoegde- of hydrodynamische demping (Engels: hydrodynamic damping) oplevert. Afhankelijk van de configuratie van de bundel, de grootte van de aanstroomsnelheid en de eigenschappen van het stromende medium, kunnen de toegevoegde stijfheid en de hydrodynamische demping zodanige waarden aannemen, dat de buigstijfheid of de structurele demping van de vaste stof gecompenseerd wordt.

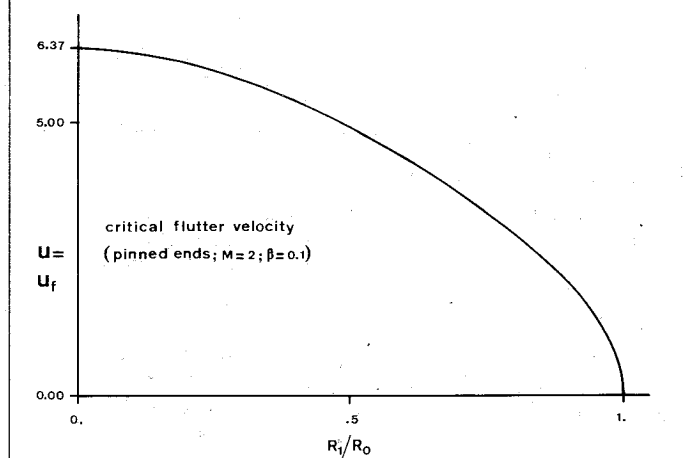
In het eerste geval verliest het systeem zijn stijfheid ($\Omega = 0$) en er treedt buckling (knik) op. In het tweede geval worden de energie dissiperende eigenschappen gecompenseerd of overtroffen door de energie die de stroming aan de bundel afstaat: er treedt flutterinstabiliteit op.

Een goed beeld van interactie-effecten op de kritische buckling- en fluttersnelheid geven figuur 5a en 5b. Een flexible pijp wordt met een uniforme snelheid u in langsrichting omstroomd. Het stromende medium is begrensd door een starre cilindermantel, die centrisc ten opzichte van de pijp is geplaatst.

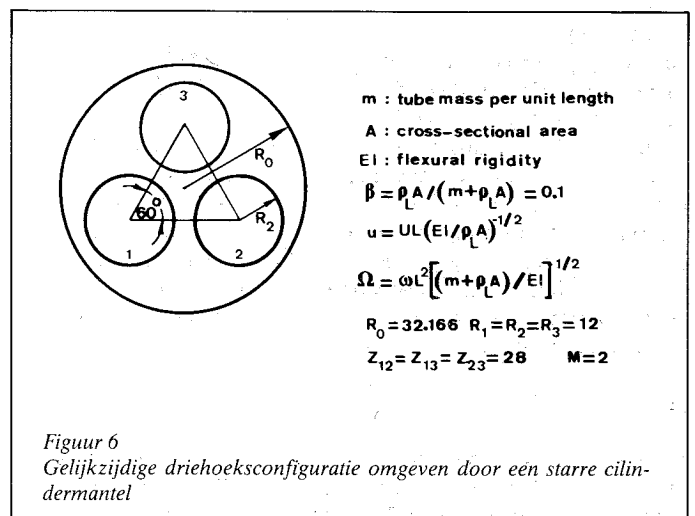
Het blijkt, dat verkleining van de onderlinge afstand der wanden een sterk reducerende invloed heeft op beide kritische snelheden. Teneinde de invloed van de snelheid op het frequentiespectrum van een driehoeksconfiguratie met starre buitencilinder (figuur 6) te analyseren, werden in figuur 7 de reële en complexe delen van bij vier trillingsmodes horende frequenties als functie van de aanstroomsnelheid u uitgezet. Bij toenemende snelheid dalen alle (nog reële) frequenties, totdat één paar de waarde nul aanneemt: er treedt buckling op. De resterende twee verlaten voortijdig de reële as: hun kritische fluttersnelheden zijn dan bereikt. (Voor een gedetailleerde beschrijving van figuur 7 wordt verwezen naar [5]).



Figuur 5a
De invloed van een starre cilindermantel op de bucklingsnelheid van één pijp



Figuur 5b
De invloed van een starre cilindermantel op de fluttersnelheid van één pijp



Figuur 6
Gelijkzijdige driehoeksconfiguratie omgeven door een starre cilindermantel

In figuur 8 is de instabiele beweging van de driehoeksconfiguratie geschetst voor de laagste frequentie behorende bij de eerste axiale trillingsmode, op het moment dat flutter optreedt. De horizontale en verticale verplaatsingscomponenten zijn gekoppeld, hetgeen zich manifesteert in een spiraalbeweging voor elke pijp.

Uit het voorafgaande blijkt duidelijk de grote invloed, die de koppelingseffecten hebben op het buckling- en fluttergedrag. Een dynamische analyse van de bundel, gebaseerd op het gedrag van één pijp, zonder het in rekening brengen van zijn omgeving, leidt tot een sterke overschatting van beide kritische snelheden.

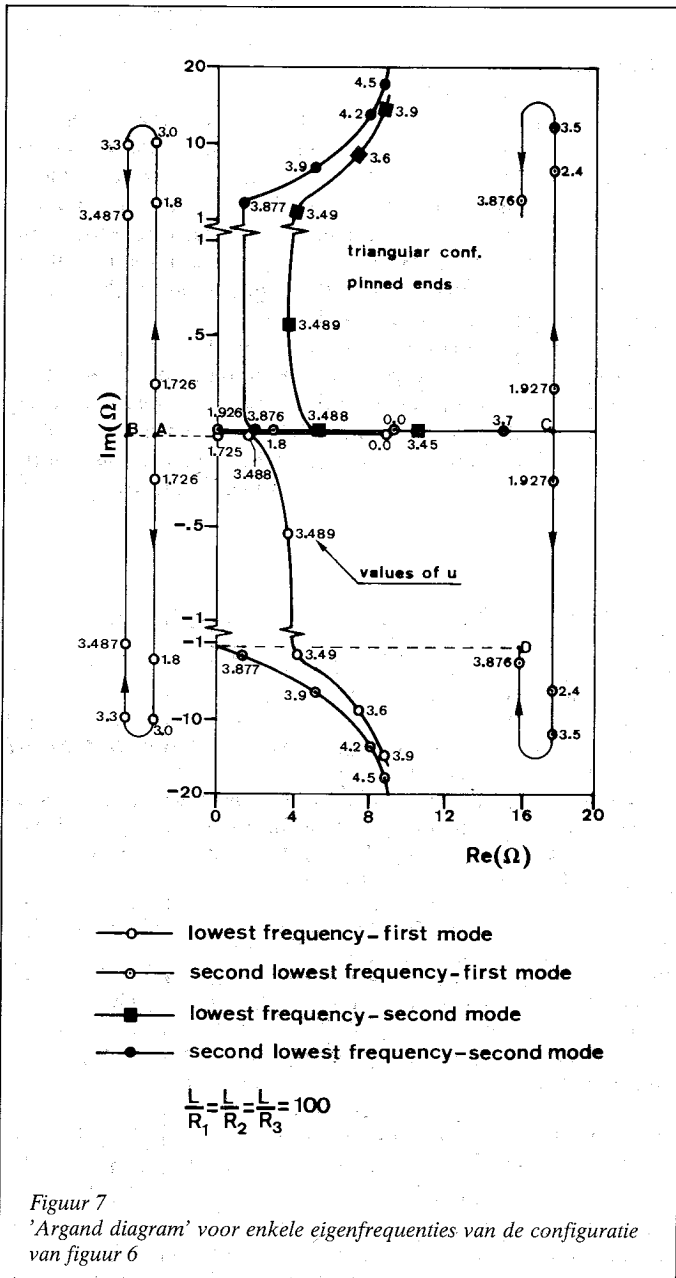
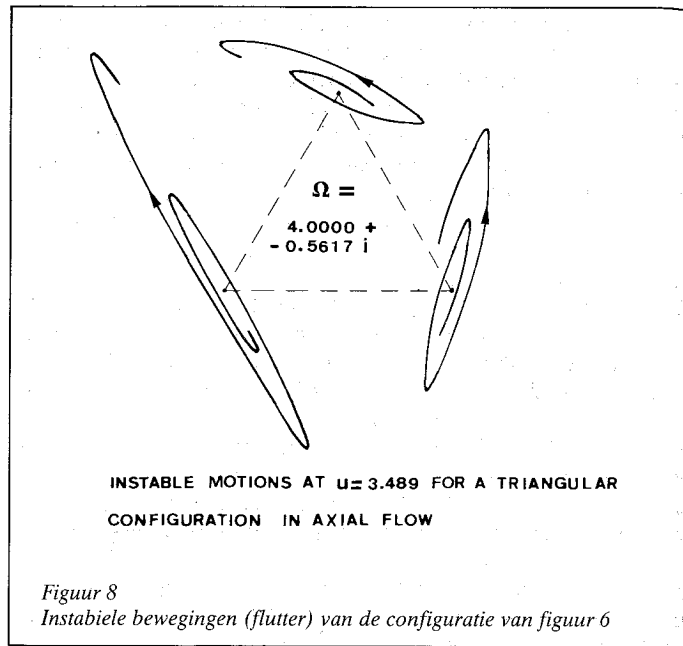
Dwarsstroming

In het geval van dwarsstroming (Engels: cross flow) worden de pijpen loodrecht op hun lengte-assen aangestroomd. In tegenstelling tot langsstroming kan de bundel zowel door gedwongen- als zelfgeïnduceerde trillingen in resonantie geraken, waarbij tevens combinaties van beide vormen kunnen voorkomen [6].

Tot het eerste type behoren onder andere trillingen opgewekt door

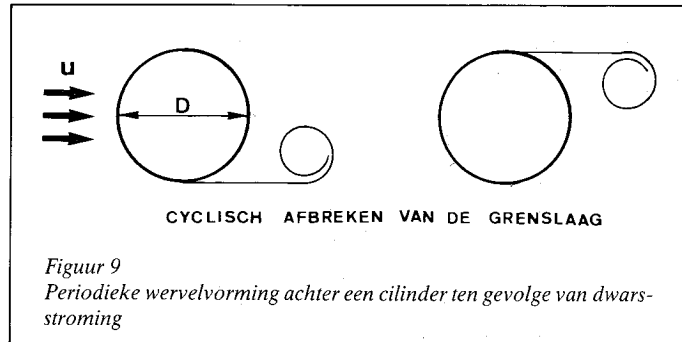
Stromingsgeïnduceerde trillingen in warmtewisselaars

turbulentie in de stroming, periodieke fluctuaties van de stroming ten gevolge van externe invloeden en trillingen, die veroorzaakt worden door periodieke wervelvorming in het zog van de pijpen. Bij het zelfgeïnduceerde type spelen het zogenaamde snelheids- en verplaatsingsmechanisme een belangrijke rol. Over beide typen zal een korte beschouwing plaatsvinden, waarbij aandacht zal worden besteed aan periodieke wervelvorming en het snelheids- en verplaatsingsmechanisme.



Periodieke wervelvorming

Wordt één enkele pijp dwars aangestroomd, dan zal boven een zekere aanstroomsnelheid een wervelreeks in de zogstroom optreden. Deze wervelreeks wordt veroorzaakt door een instabiel afbreken van de grenslaag en wel periodiek aan boven- en onderzijde van de pijpdoorsnede (figuur 9).



Periodieke wervelvorming (Engels: vortex shedding) treedt op in het gebied waar het kenttal van Reynolds Re varieert tussen circa 300 en circa $2 \cdot 10^5$. De pijp ondervindt wisselende krachten in een richting loodrecht op de pijpas en kan daardoor in trilling geraken. Ook kan het stromende medium zelf in trilling worden gebracht: vloeistofschommelingen of, bij een gas, een akoestische staande golf in het stromingskanaal.

De 'afschud'- of 'wervelfrequentie' f_v , waarmee de periodieke wervelvorming optreedt, voldoet aan de relatie $f_v = S \cdot U/D$, met als evenredigheidsconstante het Strouhalgetal S . Dit getal is voor een enkele cilindrische pijp gelijk aan 0,2. Voor pijpenbundels is S echter afhankelijk van de configuratie en tal van andere parameters [1, 7].

Het boven beschreven mechanisme kan worden gekenmerkt als een harmonisch gedwongen trilling. Wordt bij een bepaalde aanstroomsnelheid de 'wervelfrequentie' f_v gelijk aan de eigenfrequentie van de pijp (of bundel), dan geraakt deze resonantie.

Snelheids- en verplaatsingsmechanisme

In compacte bundels kunnen trillingen optreden van het zelfgeïnduceerde type bij snelheden, die onder de kritische snelheid van

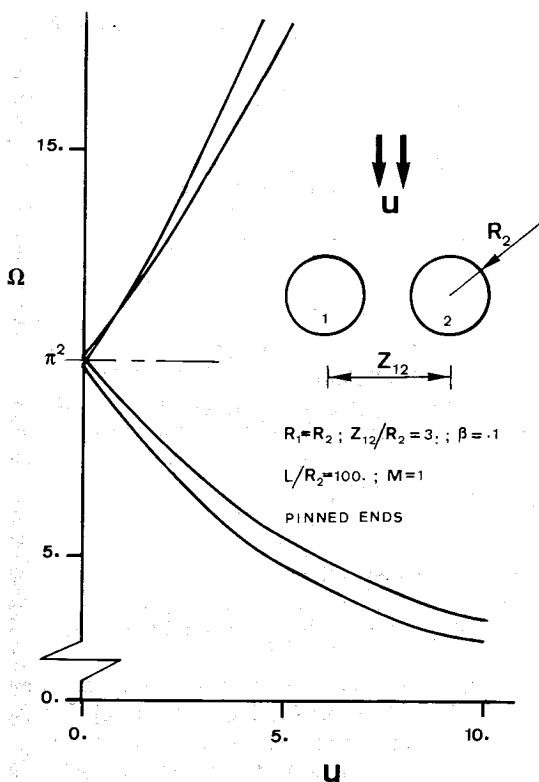
vortex shedding resonantie liggen. Bij het zogenaamde snelheidsmechanisme [8] is de druk van het medium ten plaatse van het pijpoppervlak evenredig met de snelheid van de pijpen. Evenals bij langsstroming resulteert dit in een hydrodynamische demping van het systeem. Uit figuur 10 blijkt de invloed die de stroomsnelheid heeft op de vier eigenfrequenties van een 2-cilinder configuratie ($M = 1$), die loodrecht op het vlak door de hartlijnen van de cilinders wordt aangestroomd: bij toenemende snelheid vertoont één paar frequenties een progressieve stijging, terwijl het andere paar degressief daalt.

De trillingsvormen behorende bij deze configuratie zijn gekoppeld met betrekking tot de twee verplaatsingscomponenten u_p en v_p , hetgeen resulteert in ellipsvormige bewegingen van beide cilinders (figuur 11). In de literatuur worden zij aangeduid als zogenaamde 'orbital' of 'oval motions' [8, 9].

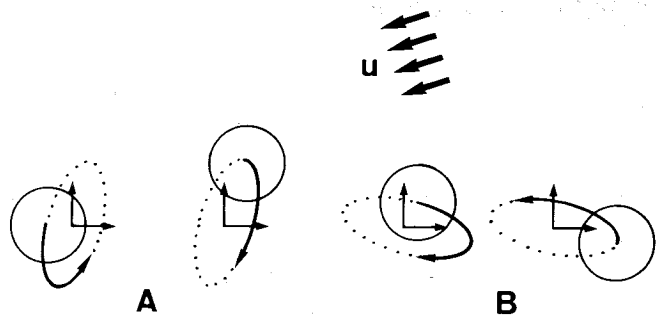
Bij het verplaatsingsmechanisme is de druk van het medium evenredig met de verplaatsing van de pijpen ten opzichte van elkaar, waardoor de stijfheid van het systeem beïnvloed wordt. Het trillingstype dat hierbij hoort staat bekend als fluid elastic vibration.

Connors [10] onderzocht aan de hand van een quasi-statische analyse de stabiliteit van een pijpenbundel met betrekking tot dit laatstgenoemde fenomeen. Dit resulteerde in een vergelijking voor de kritische snelheid, waarbij instabiliteit optreedt. De semi-experimentele benadering van Connors vereist het bepalen van geometriegebonden factoren aan de hand van vooronderstelde trillingsvormen van de pijpen.

Een meer algemene opzet voor de beschrijving van zowel het snelheids- als verplaatsingsmechanisme is momenteel in studie. Hierbij worden de relatieve positieveranderingen van de pijpen in rekening gebracht. Dit model moet bovendien in staat zijn de gedwongen trillingen ten gevolge van fluctuaties in het stromende medium weer te geven.



Figuur 10
De invloed van de snelheid u op de eigenfrequenties van een 2-cilinder configuratie



OVAL MOTIONS FOR TWO CYLINDERS IN CROSS FLOW

A: LOWEST FREQUENCY

B: SECOND LOWEST FREQUENCY

Figuur 11

De gekoppelde trillingsvormen van een 2-cilinder configuratie in dwarsstroming

Slotopmerking

Uit het voorafgaande (beknopte) overzicht van enkele belangrijke stromingsgeïnduceerde trillingsfenomenen blijkt de intensieve wisselwerking tussen de 'vaste stof' en het stromende medium, hetgeen tot uiting komt in een sterke beïnvloeding van het frequentiespectrum van het systeem. Het uit constructief oogpunt belangrijke vrije trillingsgedrag van een omstroomde pijpenbundel wordt in hoge mate bepaald door de geometrie (het aantal pijpen, hun rangschikking en spatiëring).

Indien met bij de dimensionering van een bundel rekening wil houden met mogelijk optredende instabiliteiten, is een dynamische analyse gebaseerd op één enkele pijp ontoereikend; met name bij compacte bundels dienen de interactie-effecten tussen de pijpen onderling in rekening te worden gebracht, omdat zij aanleiding geven tot een aanmerkelijke reductie van de kritische snelheden.

Literatuur

- [1] Blevins, R.D., *Flow-induced vibration*, van Nostrand Reinhold Company, New York (1977)
- [2] Blevins, R.D., *Formulas for natural frequency and mode shape*, van Nostrand Reinhold Company, New York (1979)
- [3] Weppelink, H., *Free vibrations of finite circular cylindrical shells and tubes with and without a surrounding fluid*, proëfschrift THT oktober (1979)
- [4] Van der Hoogt, P.J.M., Weppelink, H., van Campen, D.H., *Three-dimensional calculation of the coupled vibrations of a group of circular tubes in an unconfined fluid*, Trans. fifth International Conference Struct. Mech. in Reactor Technology, Berlin (1979)
- [5] Van der Hoogt, P.J.M., Hartsuiker, L., van Campen, D.H., *Free vibrations of finite flexible shells and tubes in axial flow*, Twentieth IAHR Congress, Moscow, september (1983)
- [6] Chen, S.S., *Crossflow-induced vibrations of heat exchanger tube banks*, Nuclear Engineering and Design 47 p. 67-86 (1978)
- [7] Chen, Y.N., *Flow-induced vibration and noise in tube-bank heat exchangers due to von Karman Streets*, Trans. ASME, february (1968)
- [8] Chen, S.S., *Experiment and analyses of instability of tube rows subjected to liquid crossflow*, Trans. ASME, Vol. 49, december (1982)
- [9] Paidoussis, M.P., Suss, S., *Flow-induced instabilities of clusters of flexible cylinders in axial flow contained in a cylindrical channel*, Trans. fourth International Conference Struct. Mech. in Reactor Technology, San Francisco (1977)
- [10] Connors, H.J., *Fluidelastic vibration of tube arrays excited by cross flow*. Paper presented at the Symposium on Flow Induced Vibration in Heat Exchangers, ASME Winter Annual Meeting, december (1970)