
Octrooiraad



[10] A **Terinzagelegging** [11] **7315487**

Nederland

[19] NL

[54] 3He-4He verdunningskoelmachine.

[51] Int.Cl²: F25B23/00, F25J1/00.

[71] Aanvrager: N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken te Eindhoven.

[74] Gem.: Dr. J.W. Schuttevaer c.s.
Internationaal Octroobureau B.V.
Prof. Holstlaan 6
Eindhoven.

[21] Aanvraag Nr. 7315487.

[22] Ingediend 13 november 1973.

[32] --

[33] --

[31] --

[23] --

[61] --

[62] --

[43] Ter inzage gelegd 15 mei 1975.

De aan dit blad gehechte stukken zijn een afdruk van de oorspronkelijk ingediende beschrijving met conclusie(s) en eventuele tekening(en).

Aanvrager: N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN te EINDHOVEN

Gemachtigde: Internationaal Octrooibureau B.V., Prof. Holstlaan 6 te Eindhoven
(Dr. J.W. Schuttevaer c.s.)

Ingeroepen recht van voorrang: geen

Korte aanduiding: ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ verdunningskoelmachine.

5 De uitvinding heeft betrekking op een ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ verdunningskoelmachine voor temperaturen beneden het λ -punt van helium, welke machine is voorzien van een toevoerleiding voor een stroom geconcentreerd, gekoeld ${}^3\text{He}$ die uitmondt in een mengkamer voor ${}^3\text{He}$ en ${}^4\text{He}$, welke mengkamer via een verbindingsleiding voor een stroom verdund ${}^3\text{He}$ is verbonden met een distilleerreservoir voor scheiding van verdund ${}^3\text{He}$ in ${}^3\text{He}$ en ${}^4\text{He}$, welk reservoir is voorzien van een afvoer voor hoofdzakelijk ${}^3\text{He}$ in gasvorm, waarbij een continue warmteuitwisselaar aanwezig is die enerzijds in de toevoerleiding en 10 anderzijds in de verbindingsleiding is opgenomen voor warmte-uitwisseling tussen de geconcentreerde en de verdunde, koude- ${}^3\text{He}$ stroom.

7315487

Een koelmachine van de aangeduide soort is bekend uit Cryogenics, April 1966, blz. 80-88. Een dergelijke koelmachine wordt ook wel mengkoelmachine genoemd.

Onder een "continue" warmteuitwisselaar dient te worden verstaan een warmteuitwisselaar waarin tijdens bedrijf gezien in doorstroomrichting, een temperatuurgradiënt heerst langs de warmteoverdragende scheidingswand tussen de beide warmteuitwisselende media. Dit in tegenstelling tot een "discrete" warmteuitwisselaar ("step-exchanger"), waarbij geen temperatuurgradiënt in de doorstroomrichting langs de warmteoverdragende scheidingswand optreedt, d.w.z. de warmteuitwisseling vindt plaats tussen twee discrete temperatuurniveaus.

Tijdens bedrijf van de verdunningskoelmachine wordt geconcentreerd, vloeibaar ^3He aan de ^3He - ^4He bevattende mengkamer toegevoerd.

Beneden $0,87^\circ\text{K}$ treedt in het vloeibare ^3He - ^4He mengsel in de mengkamer een fasenscheiding op en wel in een ^3He -rijke fase die zich als vloeistof gedraagt en in een ^3He -arme fase die zich als gas gedraagt. De geconcentreerde ^3He -fase drijft hierbij bovenop de verdunde, ^3He -arme, fase.

Wanneer aan de mengkamer toegevoerd geconcentreerd ^3He het grensvlak met de verdunde ^3He -fase passeert treedt er een koeleffect op tengevolge van het grote verschil tussen de molaire enthalpieën van geconcentreerd en verdund ^3He .

Er treedt bij de overgang als het ware verdamping van vloeibaar ^3He op, waarbij de verdampingswarmte het koeleffect levert. ^3He atomen die het grensvlak passeren worden via de verdunde fase naar het distilleerreservoir van hogere temperatuur getransporteerd op grond van de hoge osmotische druk van het ^3He in de verdunde oplossing.

Het distilleerreservoir is normaliter verbonden met een pompsysteem. In het distilleerreservoir worden de beide heliumisotopen gescheiden door een distillatieproces.

7315487

De afgezogen gasfase is rijk aan ^3He (bijvoorbeeld 96%), terwijl de verdunde vloeibare oplossing zeer weinig ^3He bevat.

Het nagenoeg zuivere ^3He gas wordt gecondenseerd en via de toevoerleiding weer aan de bovenzijde van de mengkamer gesuppleerd, waarmee de kringloop is gesloten.

Teneinde warmtetransport door geconcentreerd ^3He naar de mengkamer te minimaliseren wordt dit geconcentreerde ^3He onderweg in warmteuitwisseling gebracht met het koudere, verdunde ^3He dat van de mengkamer op weg is naar het distillatiereservoir.

Om temperaturen van om en nabij $0,025\text{ }^\circ\text{K}$ in de mengkamer te realiseren kan worden volstaan met alléén een continue warmteuitwisselaar.

Ligt de vereiste temperatuur in de buurt van of beneden $0,010\text{ }^\circ\text{K}$, dan is het bekend om tussen de continue warmteuitwisselaar en de mengkamer één of meer in serie geschakelde, discrete warmteuitwisselaars (gesinterd koper-warmteuitwisselaars; dunne folie-platenwarmteuitwisselaars) in de toevoer- en verbindingleiding op te nemen.

Bij de bekende verdunningskoelmachines wordt de continue warmteuitwisselaar als tegenstroomwarmteuitwisselaar gebruikt, waarin het geconcentreerde en het verdunde ^3He elkaar in tegenstroom ontmoeten. Dit brengt enkele problemen met zich mee, primair veroorzaakt door de zwaartekracht.

Loopt de geconcentreerde ^3He -stroom naar beneden en de verdunde ^3He -stroom naar boven, dan geeft dit aanleiding tot instabiliteiten door het optreden van convectie in de verdunde ^3He -stroom. Onderweg van het lagere temperatuurgebied in de mengkamer naar het hogere temperatuurgebied in het distillatiereservoir treedt in het warmteuitwisselingsgebied van de verdunde oplossing een temperatuurgradiënt op in de stromingsrichting. Om te voldoen aan de voorwaarde van een constante osmotische druk in de superfluïde fase neemt de ^3He concentratie in de verdunde oplossing in de richting van het distillatiereservoir af. Een afname van de ^3He -concent-

7315487

tratie betekent echter een toename van de massadichtheid van de verdunde oplossing, dat wil zeggen de verdunde oplossing in de buurt van het distillatiereservoir is soortelijk zwaarder dan die in de buurt van de mengkamer. De zwaartekracht, tesamen met de massadichtheidsgradiënt, veroorzaakt nu convectie in de verdunde oplossing, waardoor de voorwaarde van constante osmotische druk wordt verstoord en er stromingsinstabiliteiten, gepaard gaande met energieverliezen, optreden

Loopt de geconcentreerde ^3He -stroom naar boven en de verdunde ^3He -stroom naar beneden, dan treedt er geen storende convectie op in de verdunde ^3He -stroom.

Bij de geconcentreerde ^3He -stroom zouden zich geen moeilijkheden voordoen indien de stroom uit/zuiver ^3He zou bestaan. Normaliter is echter nog altijd een zeker percentage (bijvoorbeeld 4%) ^4He aanwezig in de geconcentreerde ^3He stroom. Bij koeling van laatstgenoemde stroom tot beneden $0,3 - 0,4$ °K in de continue warmteuitwisselaar treedt fasescheiding in deze warmteuitwisselaar op (gelijk in de mengkamer). Onder invloed van de zwaartekracht verzamelt de verdunde fase (^4He) zich in het onderste gedeelte van het betrokken doorstroomkanaal der warmteuitwisselaar. Analoot aan het proces in de mengkamer treedt nu in dit onderste gedeelte van het warmteuitwisselaarkanaal een koeleffect op bij doorgang van ^3He door de opgehoopte verdunde, superfluïde fase, waardoor het kanaaldeel in temperatuur daalt. Het resultaat is dat er vrijwel geen temperatuurverschil meer bestaat tussen dit kanaaldeel met verdunde fase en het andere hiermee in warmteuitwisselende contact staande kanaaldeel waarin eveneens verdund ^3He aanwezig is.

Er wordt dan vrijwel geen warmte meer overgedragen tussen de beide kanaaldelen, zodat het onderste deel van de warmteuitwisselaar nog nauwelijks werkzaam is. Bovendien kan de stroomsnelheid van ^3He in de beide verdunde gebieden hoog worden, hetgeen resulteert in aanzienlijke drukgradiënten

7315487

ten gevolge van het visceuze gedrag van het door het superfluïde helium bewegende ³He. De wrijvingswarmte die hierdoor wordt opgewekt draagt eveneens bij tot een verlaging van het thermisch rendement van de continue warmteuitwisselaar.

5 Doel van de onderhavige uitvinding is een oplossing voor de geschetste problematiek te verschaffen.

Ter verwezenlijking van het beoogde doel ver-
toont de ³He-⁴He verdunningskoelmachine volgens de uitvin-
ding het kenmerk, dat de continue warmteuitwisselaar gescha-
keld als meestroomwarmteuitwisselaar voor de geconcentreerde
10 en verdunde ³He stroom in de toevoer- en verbindingsleiding
is opgenomen, waarbij de continue meestroomwarmteuitwisselaar
tijdens bedrijf zodanig is opgesteld dat de beide warmteuit-
wisselende stromen in verticale zin naar beneden gaan.

15 Op deze wijze is bereikt dat zowel storende
convectie in de verdunde ³He-stroom als accumulatie van ver-
dunde fase (superfluïde helium) in het deel van de continue
warmteuitwisselaar waardoorheen geconcentreerd ³He stroomt,
is voorkomen.

20 Bij een gunstige uitvoeringsvorm van de ³He-⁴He
verdunningskoelmachine volgens de uitvinding is de continue
meestroomwarmteuitwisselaar onderverdeeld in meerdere, in
serie geschakelde, continue meestroomwarmteuitwisselings-
elementen, waarbij van elk continu meestroomwarmteuitwisse-
lingselement het warmteoverdragend oppervlak σ tussen de
25 geconcentreerde en de verdunde ³He stroom voldoet aan de
betrekking :

$$\sigma \leq \frac{60 \dot{n}_{ci}}{c T_{ci}^2} \quad \text{waarin}$$

\dot{n}_{ci} = het aantal molen ³He dat per seconde wordt gecirculeerd;

30 T_{ci} = ingangstemperatuur in °K van de geconcentreerde ³He-
stroom voor het meestroomwarmteuitwisselingselement.

c = de Kapitza-geleidingscoëfficiënt van de warmteoverdragende
wand, gedefinieerd als $\frac{0}{T_c - T_d}$ waarin

\dot{Q} = warmtestroomdichtheid in Watts/cm² door de warmteoverdragende wand ;

T_c = temperatuur in °K van de geconcentreerde ³He-stroom in het meestroomwarmteuitwisselingsselement ;

5 T_d = temperatuur in °K van de verdunde ³He-stroom in het meestroomwarmteuitwisselingsselement.

Het is gebleken dat op deze wijze een optimaal gebruik van het warmteoverdragende oppervlak tussen de geconcentreerde en verdunde ³He-stroom en zodoende een warmte-
10 uitwisselingsysteem met een zeer hoog thermisch rendement is verkregen.

Voor metalen ligt de Kapitza geleidingscoëfficiënt in de grootte-orde van $2,5 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{°K}^{-4}$; voor kunststoffen in de orde van $17,5 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{°K}^{-4}$.

15 Een verdere gunstige uitvoeringsvorm van de ³He-⁴He verdunningskoelmachine volgens de uitvinding is gekenmerkt doordat elk continu meestroomwarmteuitwisselingsselement bestaat uit twee coaxiaal en onderling op afstand opgestelde buiselementen met de wand van het binnenste buiselement als
20 warmteoverdragende wand.

Op grond van thermodynamische beschouwingen alsmede vanwege de relatief kleine vloeistofinhoud en derhalve kleine warmtecapaciteit biedt dit het voordeel dat elk continu meestroomwarmteuitwisselingsselement op zichzelf een
25 hoog thermisch rendement bezit.

De uitvinding zal nader worden toegelicht aan de hand van de tekening, waarin bij wijze van voorbeeld een ³He-⁴He verdunningskoelmachine met een uit drie, in serie-geschakelde, elementen opgebouwde continue meestroomwarmte-
30 uitwisselaar schematisch en niet op schaal is weergegeven. In de fig. is met het verwijzingscijfer 1 een toevoerleiding aangeduid die uitmondt in een mengkamer 2, welke kamer via een verbindingsleiding 3 in verbinding staat met een distillatiereservoir 4 dat voorzien is van een stroom 5.

35 *Stroom 5 is via een afleiding 6 verbonden met*

7315487

diffusiepomp 7, waarop een rotatiepomp 8 aansluit. Uitgang
9 van rotatiepomp 8 sluit via een leiding 10 aan op toevoer-
leiding 1. In leiding 10 zijn opgenomen warmteuitwisselaars
11, 12, 13 en 14 die zich bevinden binnen respectievelijk
5 reservoir 15, 16, 17 en distilleerreservoir 4.

In genoemde reservoirs vindt condensatie en
verdere voorcoeling van geconcentreerd ^3He plaats. Reservoir
15 is dan bijvoorbeeld gevuld met vloeibare stikstof (78°K)
terwijl de reservoirs 16 en 17 vloeibaar helium van $4,2^\circ\text{K}$
10 respectievelijk bijvoorbeeld $1,3^\circ\text{K}$ bevatten.

De koelmachine vertoont verder een continue
meestroomwarmteuitwisselaar 20 die is opgebouwd uit drie
elementen 20a, 20b en 20c die in serie geschakeld enerzijds
in toevoerleiding 1 en anderzijds in verbindingsleiding 3
15 zijn opgenomen. De elementen zijn zodanig verticaal opge-
steld dat tijdens bedrijf de twee stromen in de toevoer- en
verbindingsleiding beiden in benedenwaartse richting, dus
met de zwaartekracht mee, door de warmteuitwisselaarelemen-
ten gaan.

20 Tijdens bedrijf wordt door rotatiepomp 8 aan
leiding 10 toegevoerd nagenoeg zuiver ^3He -gas in de warmte-
uitwisselaars 11 tot en met 14 gecondenseerd en gebracht op
een temperatuur van ca. $0,7^\circ\text{K}$. Het gecondenseerde, ge-
concentreerde ^3He ondergaat in de continue meestroomwarmte-
25 uitwisselaarelementen 20a-b-c- een verdere temperatuurver-
laging en treedt vervolgens mengkamer 2 binnen, alwaar zich
twee door een grensvlak 21 gescheiden fasen 22 en 23 van
respectievelijk geconcentreerd ^3He en superfluide verdund
 ^3He (^3He opgelost in ^4He) bevinden. Overgang van ^3He uit
30 fase 22 via grensvlak 21 naar fase 23 heeft een koeleffect
tengevolge. Het ^3He dat het grensvlak 21 is gepasseerd wordt
in de verdunde fase via verbindingsleiding 3 naar distilleer-
reservoir 4 getransporteerd en koelt daarbij onderweg in de
continue warmteuitwisselings-elementen in meestroom het ge-
35 concentreerde ^3He dat op weg is naar de mengkamer 2. In

7315487

distilleerreservoir 4 wordt het verdunde ^3He gescheiden in ^3He en ^4He . Het nagenoeg zuivere ^3He wordt via afvoer 5 en afzuigleiding 6 afgezogen door het uit diffusiepomp 7 en rotatiepomp 8 bestaande pompsysteem en daarna weer aan leiding 10 toegevoerd.

Het warmteoverdragend oppervlak σ tussen de geconcentreerde en verdunde ^3He stroom van elk der drie meestroomwarmteuitwisselingselementen 20a-b-c voldoet aan de betrekking

$$\sigma \leq \frac{60 \dot{n}}{c T_{ci}^2} \quad \text{waarin}$$

\dot{n} = het aantal molen ^3He dat per seconde wordt rondgepompt;

c = de Kapitza geleidingscoëfficiënt ;

T_{ci} = de ingangstemperatuur van de geconcentreerde ^3He -stroom voor het betrokken warmteuitwisselingselement.

De genoemde ingangstemperatuur komt kwadratisch voor in de noemer van het rechter deel der betrekking. Met een lagere ingangstemperatuur van de geconcentreerde ^3He stroom correspondeert een groter toegestaan warmteoverdragend oppervlak van het bijbehorende warmteuitwisselings-element. Een en ander is in de figuur tot uitdrukking gebracht. De door toevoerleiding 1 gaande geconcentreerde ^3He stroom neemt van boven naar beneden in temperatuur af. Het warmteoverdragend oppervlak van element 20c is groter dan dat van 20b, dat op zijn beurt groter is dan dat van 20a doordat de elementen onderling verschillende doorstroamlengten bezitten.

Doordat in de meestroomwarmteuitwisselaar 20 de geconcentreerde en verdunde ^3He stroom beiden met de zwaartekracht mee naar beneden gaan zijn de in de inleiding genoemde bezwaren ondervangen. Door de opbouw van de meestroomwarmteuitwisselaar uit afzonderlijke, in serie geschakelde elementen met onderling verschillende warmteoverdragende oppervlakken is een warmteoverdragend systeem verkregen met een zeer hoog thermisch rendement. Bij voorkeur bestaan de

7315487

elementen uit twee concentrische buizen met de binnenbuiswand voor de warmteoverdracht tussen de beide stromen. Vanzelfsprekend is het mogelijk de continue meestroom-warmteuitwisselaar in twee of meer dan drie elementen onder te verdelen en daarbij te voldoen aan de eerdergenoemde betrekking.

De condensatie en voorcoeling van het geconcentreerde ^3He kan geschieden anders dan met een bad vloeibare stikstof en twee baden vloeibaar helium, terwijl ook andere pompsystemen, al dan niet op kamertemperatuur werkend, mogelijk zijn. Desgewenst kunnen ook nog discrete warmteuitwisselaars (bijvoorbeeld van gesinterd koper) tussen continu warmteuitwisselingselement 20c en mengkamer 2 in de toevoer- en verbindingsleiding 1 respectievelijk 3 worden opgenomen.

CONCLUSIES:

1. ^3He - ^4He verdunningskoelmachine voor temperaturen beneden het λ -punt van helium, welke machine is voorzien van een toevoerleiding voor een stroom geconcentreerd, gekoeld ^3He die uitmondt in een mengkamer voor ^3He -en ^4He , welke mengkamer via een verbindingsleiding voor een stroom verdund ^3He is verbonden met een distilleerreservoir voor scheiding van verdund ^3He in ^3He en ^4He , welk reservoir is voorzien van een afvoer voor hoofdzakelijk ^3He in gasvorm, waarbij een continue warmteuitwisselaar aanwezig is die enerzijds in de toevoerleiding en anderzijds in de verbindingsleiding is opgenomen voor warmteuitwisseling tussen de geconcentreerde en de verdunde, koudere ^3He -stroom, met het kenmerk, dat de continue warmteuitwisselaar geschakeld als meestroomwarmteuitwisselaar voor de geconcentreerde en verdunde ^3He stroom in de toevoer-en verbindingsleiding is opgenomen, waarbij de continue meestroomwarmteuitwisselaar tijdens bedrijf zodanig is opgesteld dat de beide warmteuitwisselende stromen in verticale zin naar beneden gaan.

2. ^3He - ^4He verdunningskoelmachine volgens conclu-

sie 1, met het kenmerk, dat de continue meestroomwarmteuitwisselaar is onderverdeeld in meerdere, in serie geschakelde, continue meestroomwarmteuitwisselingselementen, waarbij van elk continue meestroomwarmteuitwisselingselement het warmteoverdragend oppervlak σ tussen de geconcentreerde en verdunde ^3He stroom voldoet aan de betrekking :

$$\sigma \leq \frac{60 \dot{n}}{c T_{ci}^2} \quad \text{waarin}$$

\dot{n} = het aantal molen ^3He dat per seconde wordt gecirculeerd;

T_{ci} = ingangstemperatuur in $^{\circ}\text{K}$ van de geconcentreerde ^3He -stroom voor het meestroomwarmteuitwisselingselement;

c = de Kapitza-geleidingscoëfficiënt van de warmteoverdragende wand, gedefinieerd als $\frac{\dot{Q}}{T_c - T_d}$ waarin

\dot{Q} = warmtestroomdichtheid in Watts/cm² door de warmteoverdragende wand;

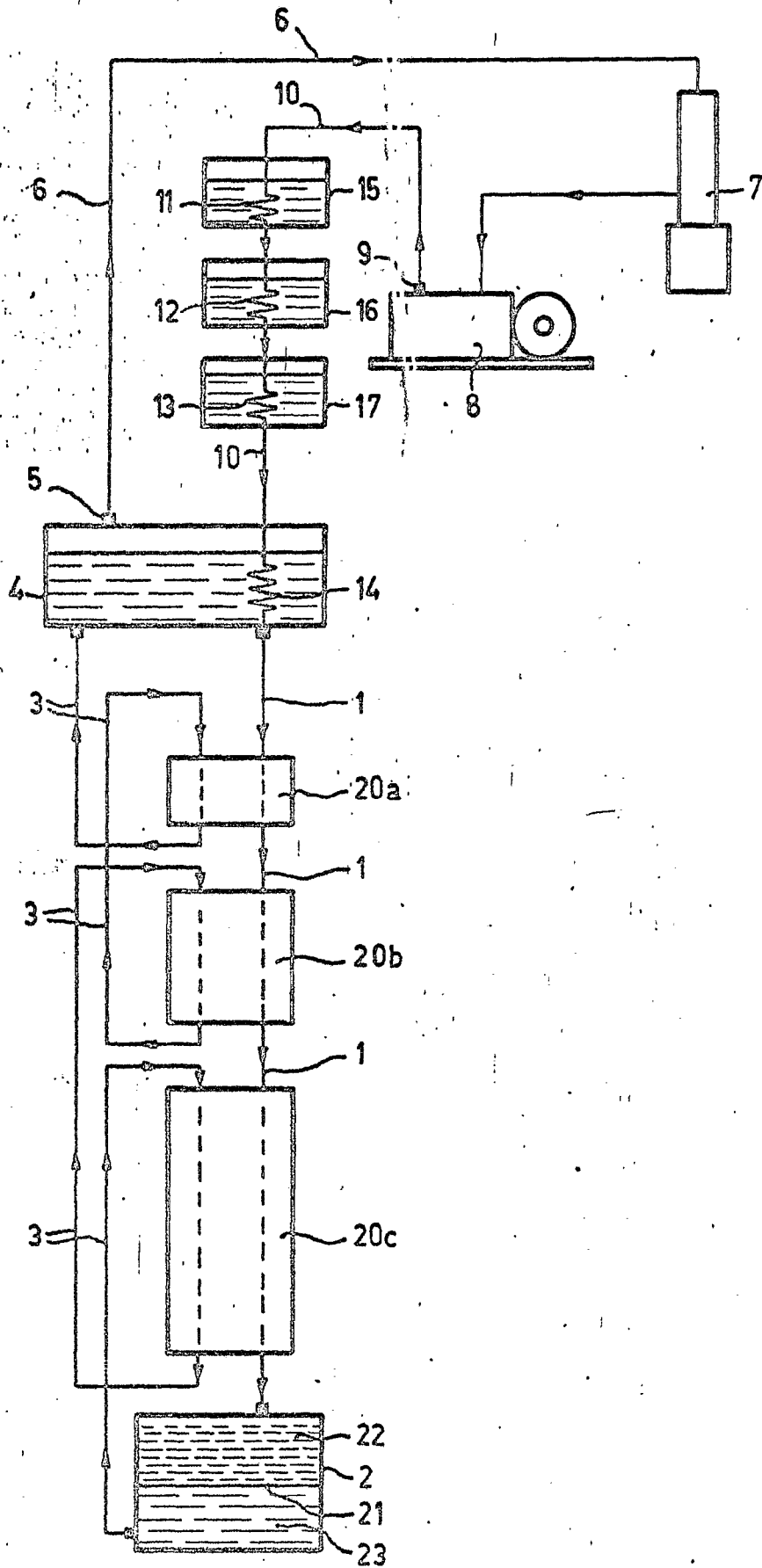
T_c = temperatuur in $^{\circ}\text{K}$ van de geconcentreerde ^3He -stroom in het meestroomwarmteuitwisselingselement;

T_d = temperatuur in $^{\circ}\text{K}$ van de verdunde ^3He stroom in het meestroomwarmteuitwisselingselement;

3. ^3He - ^4He verdunningskoelmachine volgens conclusie 2, met het kenmerk, dat elk continu meestroomwarmteuitwisselings-element bestaat uit twee coaxiaal en onderling op afstand opgestelde buiselementen met de wand van het binnenste buiselement als warmteoverdragende wand.

Eindhoven, 12 november 1973.

7315487



7315487