(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) Numéro de publication: **0 147 770**
B1

(12) # FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication du fascicule du brevet: **07.01.88**

(51) Int. Cl.⁴: **F 25 B 29/00**

(21) Numéro de dépôt: **84115702.7**

(22) Date de dépôt: **18.12.84**

(54) **Machine a induction thermique.**

(30) Priorité: **22.12.83 FR 8320573**

(43) Date de publication de la demande:
10.07.85 Bulletin 85/28

(45) Mention de la délivrance du brevet:
07.01.88 Bulletin 88/1

(84) Etats contractants désignés:
AT BE CH DE FR GB IT LI LU NL SE

(56) Documents cités:
EP - A - 0 046 112
EP - A - 0 052 452
EP - A - 0 056 147
EP - A - 0 061 721
DE - A - 1 501 144
FR - A - 453 183
FR - A - 676 668
FR - A - 2 441 135
GB - A - 422 150
US - A - 2 182 453
US - A - 2 193 535

(73) Titulaire: **ALSTHOM, 38, avenue Kléber, F-75784 Paris Cédex 16 (FR)**

(72) Inventeur: **Sterlini, Jacques, 7, rue du Mail, F - 75002 Paris (FR)**

(74) Mandataire: **Weinmiller, Jürgen et al, Lennéstrasse 9 Postfach 24, D-8133 Feldafing (DE)**

EP 0 147 770 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la date de publication de la mention de la délivrance du brevet européen toute personne peut faire opposition au brevet européen délivré, auprès de l'Office européen des brevets. L'opposition doit être formée par écrit et motivée. Elle n'est réputée formée qu'après paiement de la taxe d'opposition (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

La présente invention est relative à une machine à induction thermique, c'est-à-dire une pompe à chaleur ou un dispositif pour valoriser de la chaleur à bas niveau de température en fournissant de la chaleur à un niveau de température supérieure.

On connaît la nécessité d'économiser l'énergie. Un moyen de le faire est d'utiliser les ressources enthalpiques existantes et de les faire évoluer de leur température actuelle à une température d'utilisation, en conservant leur contenu exergétique. On peut citer à titre d'exemple de ressource enthalpique à haut niveau de température, la vapeur d'eau à 500 °C issue d'une centrale thermique. Le moyen actuel permettant de conserver au maximum l'exergie de cette ressource est d'utiliser une turbine qui produira de l'énergie mécanique transformable en énergie électrique.

On voit que la mise en œuvre exige des investissements importants.

Un autre exemple est celui d'une source enthalpique à bas niveau de température (rejet thermique d'usine, par exemple eau à 45 °C).

On peut utiliser le contenu enthalpique de cette source, pour le chauffage de locaux par exemple, en accroissant sa température jusqu'à 80 °C au moyen d'une pompe à chaleur.

Les pompes à chaleur conventionnelles à fluide de travail comprimé ont un coefficient de performance médiocre.

Elle nécessitent des éléments dynamiques (compresseurs) sujets à usure et à entretien.

On connaît aussi les machines à désorption-résorption plus particulièrement destinées à être couplées à des sources de chaleur sensibles extérieures leurs quatre composants: désorbeurs, résorbeurs, absorbeurs, dégazeurs sont bien connus.

On peut situer l'état de la technique de base des machines frigorifiques à sorption dans le document FR-A-453183 où la structure des quatre composants apparaît sous la forme de colonnes à contact diphasiques, où plusieurs catégories d'échange sont simultanément mises en œuvre:

– échange de chaleur et de matière entre la vapeur et le liquide du fluide de travail par contact direct des deux phases,

– échange de chaleur à travers les parois d'un faisceau d'échange:

a) avec un circuit caloporteur extérieur,

b) avec le fluide de travail lui-même.

On retrouve ces dispositions dans des machines plus récentes conçues comme pompe à chaleur destinées à recycler l'énergie, où l'on voit même (document EP-A-0056147) des échanges de chaleur réalisés dans des échangeurs où chacun des compartiments est lui-même un système diphasique.

On connaît aussi des systèmes multiétagés comportant deux systèmes diphasiques complexes tels que décrits ci-dessus reliés entre eux pour des boucles d'absorption (document EP-A-0061721).

Tous ces dispositifs fonctionnent néanmoins selon les principes des machines à sorption et exigent qu'on utilise comme fluide de travail des mélanges binaires comportant des propriétés spécifiques, notamment d'affinité entre le «réfrigérant» et le «solvant», et qu'on appelle couple d'absorption. Pratiquement deux couples sont utlisés dans la technique courante: les couples ammoniac-eau et bromure de lithium-eau, ce qui limite l'utilisation de ces machines à un domaine de température restreint correspondant à peu près à celui du conditionnement d'air.

Un but de l'invention est de réaliser une machine thermique ne mettant en jeu que des échanges thermiques quasi-réversibles, de manière à éviter la dégradation du contenu exergétique des ressources thermiques utilisées.

Un autre but de l'invention est de réaliser une machine qui, soit ne comporte que des moyens statiques, donc robustes et peu sujets à usure, soit combinent moyens statiques et moyens dynamiques, mais avec un rendement énergétique bien supérieur à celui fourni par les systèmes qui suivent les cycles thermiques connus.

Un autre but de l'invention est de réaliser une machine thermique réversible c'est-à-dire capable de recevoir de l'énergie thermique à un niveau de température moyen et valoriser cette énergie en la portant à haute température, aussi bien que de recevoir de l'énergie à bas et haut niveau et de la fournir à niveau intermédiaire.

Un autre but de l'invention est de s'affranchir de l'utilisation des couples d'absorption et de faire fonctionner les machines trithermes avec des solutions quelconques, y compris les solutions normales (obéissant à la loi de Raoult) ou régulières, permettant ainsi d'accéder à des fonctionnements à haute temperature.

Pour bien comprendre la structure et le fonctionnement du dispositif thermique de l'invention, il est nécessaire de rappeler quelques notions thermodynamiques et de donner un certain nombres de définitions.

L'idée de départ qui a conduit au dispositif de l'invention est qu'il est possible de réaliser des transferts thermiques statiques quasi-réversibles. Cette notion de transfert thermique statique quasi-réversible a pour origine l'étude de la distillation.

La fig. 1 représente schématiquement une colonne à distiller 1 pour la distillation d'un mélange de deux corps A et B, A étant le plus volatil. La colonne est associée à un bouilleur 2, et à un condenseur 3. L'axe des températures T est dirigé vers le bas de la figure.

Le mélange A+B est introduit en milieu de colonne à une température T_2; le corps B, à pureté contrôlée, s'écoule liquide en fond de colonne à température T_o; une partie part à la production P_B, l'autre est évaporée dans la bouilleur 2; le contenu enthalpique de la vapeur ainsi produite est distribué le long de la colonne; lorsque cette vapeur arrive en tête de colonne à température T_1, elle contient le corps A à pureté contrôlée; elle est alors condensée; une partie de A porte à la pro-

duction P_A, l'autre (reflux) est renvoyée dans la colonne. La flèche V représente le flux de vapeur et la flèche L le flux de vapeur dans une section S (T) de la colonne à la température T.

On suit habituellement les opérations physiques mises en jeu sur le diagramme de Merckel; ce diagramme (fig. 2) comprend pour chaque pression:

les fuseaux d'équilibre, concentration x(T) liquide et y(T) vapeur du corps A.

l'enthalpie h (liquide) et H (vapeur) du mélange en fonction des concentrations.

Les correspondances entre ces grandeurs sur le diagramme sont indiquées dans la fig. 2.

Il est facile de se convaincre que la distillation ainsi réalisée ne peut pas être reversible: en écrivant entre deux sections de colonne les trois équations de conservation (débit A, débit A+B, enthalpie) on s'aperçoit qu'elles ne peuvent être vérifiées toutes trois simultanément; par suite, dans la distillation classique à colonnes calorifugées, les phases liquide et vapeur en contact évoluent nécessairement hors d'équilibre.

La demanderesse a observé que pour avoir l'équilibre thermodynamique (c'est-à-dire les valeurs des concentrations des liquide x et vapeur y correspondant à l'équilibre aux pressions températures considérées), en tous points, il faut apporter ou enlever de la chaleur dans chaque tranche de colonne. Le brevet français n° 8017313 donne un exemple des moyens pouvant être mis en œuvre pour réaliser une distillation réversible.

La distillation réversible qu'on réalise de cette façon se caractérise ainsi dans chaque cas particulier par une distribution de chaleur Q(t):

$$\int_{T_o}^{T} q \, d\, T$$

telle que représentée typiquement dans la fig. 3.

Q(T) comprend plusieurs parties, et notamment:

la partie BC (épuisement E) qui traduit une activité endothermique de la colonne

CD (rectification R) qui est exothermique.

Les portions BC et CD sont toutes deux des arcs de courbes très tendus qui peuvent être assimilés à des droites, représentatives d'échanges avec des circuits caloporteurs extérieurs à chaleur spécifique constante.

La raisonnement qui vient d'être fait relativement à une colonne à distiller est valable pour tout type d'échangeur thermique, en particulier pour un système thermique constitué par exemple par une colonne à garnissage ou à plateaux équipée, sur toute sa hauteur, d'échangeurs parcourus par des circuits caloporteurs extérieurs de chaleur sensible apportant à ou extrayant de ladite colonne la distribution de chaleur linéarisée assurant son fonctionnement réversible. Un tronçon de colonne équipée d'un circuit caloporteur extérieur à débit constant peut être considéré comme un échangeur comprenant un premier compartiment, diphasique, constitué par la colonne elle-même, le deuxième compartiment étant parcouru par le fluide caloporteur extérieur. Un tel échangeur est dénommé élément de transfert thermique.

On notera qu'à travers un tel échangeur le flux d'éxergie de l'ensemble des effluents reste constant en fonction de la température, au second ordre près.

On désignera dans ce qui suit par activité thermique la quantité de chaleur reçue ou fournie dans chaque élément de transfert thermique pour assurer la réversibilité des phénomènes thermodynamiques pour chaque niveau de température T.

Un élément de transfert thermique est défini par:

la nature du mélange diphasique utilisé

les débits de fluide de travail liquide et vapeur du premier compartiment

la pression de fonctionnement de l'échangeur

les valeurs des températures entre lesquelles le fluide évolue dans l'élément.

On en déduit les puissances calorifiques appliquées à l'élément (ressources calorifiques = chaleur apportée au système, positive; utilisation calorifiques = chaleur fournie par le système, négative) et par suite, la nature du caloporteur.

A chaque élément de transfert thermique donné (dit «direct»), à pression donnée on peut faire correspondre un élément de transfert thermique «inverse», à une autre pression, dans lequel:

la nature du mélange diphasique est la même ainsi que celle du fluide caloporteur

on trouve dans l'élément direct et l'élément inverse, aux sections homologues, les mêmes débits liquide et vapeur aux mêmes concentrations des constituants du fluide de travail, mais évoluant en sens inverse en fonction de la température

les sources ont même valeur absolue pour un élément direct et un élément inverse, mais les signes sont opposés.

L'invention a pour objet une pompe à chaleur comprenant un premier ensemble comportant une colonne de distillation (K_d) fonctionnant par contact diphasique avec un fluide de travail constitué de deux corps purs miscibles, à une première valeur de pression et dans un premier domaine de température

et un second ensemble avec une seconde colonne (K_g) à contact diphasique fonctionnant à une seconde pression de valeur inférieure à la première, et dans un deuxième domaine de température,

le premier ensemble comprenant, associés à la colonne de distillation, un premier bouilleur (B_d) et un premier condenseur (C_d),

le second ensemble comprenant, associés à ladite seconde colonne un second bouilleur (B_g) et un second condenseur (C_g),

une première paire de débits étant établie entre le premier bouilleur et le second condenseur,

une seconde paire de débits étant entre le premier condenseur et le second bouilleur,

au moins un débit liquide entre deux sections intermédiaires de mêmes concentrations des

deux colonnes étant établi par soutirage dans la deuxième colonne et injection dans la première,

tous les débits établis échangant entre eux et avec les colonnes de la chaleur de manière que les échanges soient en équilibre et que chaque colonne reçoive en tout point la chaleur correspondant à la condition de réversibilité,

la température des condenseurs des deux ensembles étant approximativement la même,

les bouilleurs étant respectivement disposés à l'extrémité la plus chaude de la colonne de distillation et à l'extrémité la plus froide de la seconde colonne et reçoivant de la chaleur de sources extérieures, les condenseurs fournissant de la chaleur à des utilisations extérieures.

L'invention a également pour objet un dispositif pour valoriser de la chaleur à bas niveau de température en fournissant de la chaleur à un niveau de température supérieure comprenant un premier ensemble comportant une colonne de distillation (K_d) fonctionnant par contact diphasique avec un fluide de travail constitué de deux corps purs miscibles, à une première valeur de pression et dans un premier domaine de température,

et un second ensemble avec une seconde colonne (K_g) à contact diphasique fonctionnant à une seconde pression de valeur inférieure à la première, et dans un deuxième domaine de température,

le premier ensemble comprenant, associés à la colonne de distillation un premier bouilleur (B_d) et un premier condenseur (C_d),

le second ensemble comprenant, associés à ladite seconde colonne, un second bouilleur (B_g) et un second condenseur (C_g),

une première paire de débits étant établie entre le premier bouilleur et le second condenseur,

une seconde paire de débits étant établie entre le premier condenseur et le second bouilleur,

au moins un débit liquide entre deux sections intermédiaires de mêmes concentrations des deux colonnes étant établi par soutirage dans la deuxième colonne et injection dans la première,

tous les débits établis échangeant entre eux et avec les colonnes de la chaleur de manière que les échanges soient en équilibre et que chaque colonne reçoive en tout point la chaleur correspondant à la condition de réversibilité,

la température des bouilleurs des deux ensembles étant approximativement la même,

les condenseurs étant respectivement disposés à l'extrémité la plus chaude de la première colonne et à l'extrémité la plus froide de la seconde colonne,

les bouilleurs reçoivant de la chaleur de sources extérieures,

les condenseur fournissant de la chaleur à des utilisations extérieures.

L'invention sera bien comprise par la description donnée ci-après de divers mode de réalisation de l'invention, en référence au dessin annexé dans lequel:

La fig. 1 représente schématiquement une colonne de distillation classique;

la fig. 2 représente un diagramme de Merckel pour un mélange binaire;

la fig. 3 illustre les échanges de chaleur survenant dans une colonne de distillation effectuant un processus quasi-réversible;

la fig. 4 est un schéma de principe d'un dispositif de transfert thermique monoétagé;

la fig. 5 est un diagramme de Merckel se rapportant au dispositif de la fig. 4;

les fig. 6 à 10 sont des schémas de principe expliquant le fonctionnement d'un dispositif de transfert thermique à induction multiétagé;

la fig. 11 est un diagramme de Merckel d'un dispositif de transfert thermique à induction, multiétagé;

la fig. 12 représente schématiquement une machine à induction thermique monoétagée dans un premier mode de réalisation;

la fig. 13 est un schéma plus détaillé de la machine de la fig. 12;

la fig. 14 est une représentation encore plus détaillée de la machine des fig. 12 et 13;

les fig. 15 et 16 sont deux schémas d'une machine à induction thermique monoétagée selon un deuxième mode de réalisation;

les fig. 17 et 18 sont deux schémas d'une machine à induction thermique monoétagée selon un troisième mode de réalisation;

les fig. 19 et 20 représentent deux schémas d'échangeurs utilisés dans les machines de l'invention;

les fig. 21 représente schématiquement une machine tritherme fournissant de la chaleur à haut et bas niveau de température et recevant de la chaleur à un niveau intermédiaire;

les fig. 22A et 22B représentent schématiquement une machine monoétagée;

la fig. 23 représente une machine multiétagée obtenue par la combinaison de deux machines monoétagées représentées dans les fig. 22A et 22B;

les fig. 24 à 26 sont des schémas explicatifs pour l'élaboration d'une machine à travail extérieur;

la fig. 27 est un schéma d'une machine à induction thermique fournissant du travail;

la fig. 28 est un schéma d'une pompe à chaleur à induction thermique selon un premier mode de réalisation;

la fig. 29 est un schéma d'une pompe à chaleur à induction thermique selon une variante;

la fig. 30 est un schéma inverse de celui de la fig. 25;

la fig. 31 est le schéma d'une pompe à chaleur à induction thermique selon un troisième mode de réalisation;

les fig. 32 à 34 illustrent la réalisation d'une pompe à chaleur à induction thermique selon un quatrième mode de réalisation;

la fig. 35 représente schématiquement une pompe à chaleur selon un cinquième mode de réalisation;

la fig. 36 montre schématiquement une machine à induction thermique à travail extérieur comprenant quatre colonnes;

la fig. 37 représente la machine de la fig. 36 réduite à trois colonnes;

les figures 38 et 39 représentent des variantes respectives des figures 36 et 37;

la fig. 40 est un diagramme des isoconcentrations de liquide caloporteur en fonction de la pression et de la température;

les fig. 41 et 42 sont des schémas de machines à induction thermique à travail extérieur à 4 et 6 étages respectivement.

les fig. 1 à 3 ont déjà été commentées.

La fig. 4 représente schématiquement un dispositif selon l'invention, dans la version dite monoétagée. Le dispositif est constitué par l'association de deux colonnes à contact diphasiques (par exemple à plateaux ou à garnissages), où l'on met en jeu un fluide de travail suivant les modalités précisées ci-dessous. Le fluide de travail est un mélange d'au moins deux corps purs miscibles. Dans tout ce qui suit, on simplifiera l'exposé en ne donnant que des exemples de mélanges binaires. La fig. 4 doit être lue avec les conventions ci-après, valables, sauf indication contraire, pour tous les schémas thermiques qui seront expliqués dans ce mémoire.

L'axe de température T est dirigé vers le bas du dessin.

Dans les colonnes les flux de liquide et de vapeur sont désignés par L et V.

Les valeurs des débits adventices (définis plus loin) sont désignés par la lettre m munie d'indices.

Si on trace un axe perpendiculaire à l'axe des températures, la température est la même pour tous les points coupés par cet axe qu'il s'agisse des points de la colonne, des circuits caloporteurs ou des sources extérieures.

Pour réaliser cette condition les colonnes, les circuits caloporteurs et les sources extérieures (ressources: comptées positivement et utilisations: comptées négativement) échangent de la chaleur.

En revenant à la fig. 4, on note que la colonne C_d de droite (haute pression P, haute température) est une colonne à distiller dont la région à haute température entre T_o et T'_o est un bouilleur qui reçoit une quantité de chaleur Q_o de l'extérieur (par exemple d'un caloporteur M_o), et dont on extrait un débit liquide m_o à T_o.

La région à bas niveau est un condenseur qui rejette à l'extérieur une chaleur Q_1 entre T_1 et $T_{1'}$ (par exemple vers un caloporteur $M_{1'}$) et dont on extrait un débit de condensat m_1 à T_1.

Cette colonne comporte tout au long de son domaine de température T_oT_1 une distribution de débits élémentaires dm de soutirage ou d'injection du fluide de travail (débits adventices) qui échangent leur chaleur sensible avec la colonne; par construction les débits adventices sont ajustés pour que les échanges avec la colonne correspondent en tous points à la fourniture d'une quantité de chaleur égale à l'activité thermique de la colonne. La détermination des dm se fait de la façon suivant:

Le calcul se déroule pas par pas vers les températures décroissantes en partant de T_o. Supposons qu'à un stade du calcul on soit arrivé en T', on connaît donc L' V' et tous les dm calculés entre T_o et T', écrivons les équations pour le pas de calcul élémentaire T' T (deux équations de conservations du débit, conservation de l'enthalpie).

$$L' - V' + \Sigma dm_i = L - V + \Sigma dm_i + dm(T)$$

$$x'L' - y'V' + \Sigma x_i\, dm_i = xL - yV + \Sigma x_i\, dm_i + n\, dm$$

$$h'L' - H'V' + \Sigma h_i\, m_i = hL - HV + \Sigma h_i\, dm_i + h\, dm + dq,$$

Le liquide et la vapeur étant par en hypothèse en équilibre en T et T', les grandeurs thermodynamique (x, y, h, H) sont connues, dq est l'apport de chaleur extérieure et est une donnée; on a donc trois équations linéaires avec L, V, dm comme inconnu, on peut donc résoudre de proche en proche de T_o à T_1; la colonne ainsi obtenue est strictement réversible.

Notons que la pratique du calcul indique que les sections du type T_o ou T'_1 qui sont à limite entre une zone d'échange, et une zone adiabatique reçoivent des débits adventices de valeur finie. La colonne de gauche Cg (bouilleur entre Tg_o et $T'g_o$, condenseur entre $T'g_1$ et Tg_1, débit des caloporteurs Mg_o, Mg_1) est la colonne inverse de la colonne de droite. Ce terme inverse est expliqué plus loin. On note que les dispositions qui ont été prises pour la colonne de droite lui confèrent un fonctionnement entièrement réversible.

La colonne de gauche est à plus basse pression Pg et par suite à plus basse température; elle reçoit en sens inverse les débits adventices de la colonne de droite dans des sections homologues où règne la même concentration liquide à l'équilibre. Elle comporte les mêmes caractéristiques générales de fonctionnement que la première colonne notamment en ce qui concerne les échanges avec les dm.

Les échanges de masse donnent lieu à l'arrivée d'un dm dans une section à même concentration, même température.

Les échanges de chaleur se font à température constante. Dans la machine monoétagée que nous examinons actuellement, la pression Pg est établie de façon telle que $Tg_o = T_1$. Ainsi, l'ensemble des deux colonnes couvre de façon continue le domaine de température $T_o\ Tg_1$; on trouve une seule colonne à chaque température.

Cg sera la colonne inverse de C_d si toutes les grandeurs du type «flux» (débits, échanges de chaleur, etc.) sont égales et de signe contraire dans toutes sections homologues. Examinons à quelles conditions Cg est effectivement colonne inverse de C_d.

A cet effet écrivons les équations pour la tranche T'g Tg homologue de T' T

(1) $L'g - V'g + \Sigma dmg_i = Lg - Vg + \Sigma dmg_i + dmg\ (Tg)$

(2) $x'gL'g - y'gV'g + xgi\ dmg_i = xg\ Lg - yg\ Vg + xg_i\ dmg_i + xg\ dmg\ (Tg)$

(3) $h'gL'g - H'gV'g - hg_i\, dmg_i = hg\, Lg - Hg\, Vg + hgi\, dmg_i + hg\, dmg\, (Tg) + dqg$

dqg est l'apport de chaleur extérieure
Cg sera inverse de C si toute section à température Tg est inverse de son homologue à température T. Supposons que la section T'g soit inverse de T':

$L'g = L', V'g = V', dmg_i = dm_i$

la section Tg sera inverse de la section T si les solutions Lg, Vg, dm (tg) du système (1) + (2) + (3) sont telles que Lg = L, Vg = V, dm (Tg) = dm (T).

Pour qu'il en soit ainsi il faut:

Conditions 1

yg:y

$Hg = H + \Delta$

$hg = H + \Delta$, Δ étant une grandeur arbitraire

Condition 2

$dqg = dq$

Les conditions 1 signifient que les diagrammes de Merckel établis pour les pressions Pg et P se déduisent l'un de l'autre par une translation. Cette propriété n'est pas loin d'être réalisée dans la pratique pour la plupart des diagrammes de mélange, bien qu'elle ne le soit pas strictement; c'est en quelque sorte une «propriété à la limite» analogue au concept de gaz parfait; nous dirons dans ce cas que le diagramme de Merckel est idéal (à notre point de vue).

Pour finir on voit que l'association de deux colonnes telles que décrites ci-dessus ne peut donner lieu à un fonctionnement strictement réversible que dans un diagramme de Merckel idéal.

La condition 2 s'interprète ainsi:

Si on apporte à une colonne de la chaleur suivant une distribution donnée, on suscite dans la colonne inverse l'apparition d'un «besoin de chaleur» suivant une distribution inverse, que nous dénommerons «chaleur induite».

Ainsi, dans la fig. 4, l'apport de chaleur Q_o le long du domaine $T_oT'_o$ par un caloporteur M_o induit une chaleur de même valeur $Qg_o = Q_o$ entre Tg_o et Tg'_o, qu'on doit prélever au niveau de l'utilisation; de même l'apport Qg_1 entre $T'g_1$ et Tg_1 induit la chaleur $Q_1 = Qg_1$ entre T'_1 et T_1 qu'on doit également évacuer. Remarquons que l'on pourrait aussi bien considérer Q_o, comme induite par Qg_o, et qu'il s'agit donc bien d'un couplage entre les caloporteurs M_o et Mg_o.

La propriété qu'on vient de décrire est considéré comme essentielle, pour cette raison on dénomme les machines qui dérivent de ce principe «machine à inductions thermique».

On peut encore dégager quelques propriétés de ces systèmes:

1. On a $Q_1 - Q_o = \Sigma hi\ (T_1)\ mi$ d'où $Q_1 \simeq Q_o$
$Q_o = Qg_o$
$Q_1 = Qg_1$

$$COA = \frac{Qg_1 + Qg_o}{Q_o} \simeq 2$$

(COA = coefficient d'amplitude $= \dfrac{\text{chaleur à l'utilisation}}{\text{chaleur à la source chaude}}$)

2. La position de l'utilisation par rapport aux sources résulte de la construction (fig. 5) sur le diagramme de Merckel; elle est rigide et seule cette position est de nature à assurer un fonctionnement réversible; il faut donc la considérer comme une sorte de point nominal; l'étude des fonctionnements hors du point nominal n'aura de sens qu'à propos des machines réelles.

Les dispositifs multiétagés sont ceux où les deux colonnes, continuant de fonctionner de façon analogue à précédemment, peuvent avoir un intervalle de température en commun (fig. 6).

Lorsqu'on entreprend de calculer un tel système pas par pas en partant de T_o, en doit décider à partir de T_1 d'une procédure différente de celle décrite précédemment.

Plaçons nous au stade du calcul à une température T située dans une zone commune aux deux colonnes. Supposons que tous les débits adventices jusqu'à T' aient déjà été calculés pour la colonne de droite; la colonne de gauche en est déjà pourvue jusqu'à T'g. Pour calculer la tranche T T', on doit maintenant écrire:

2 équations de débit pour la colonne de gauche (inconnus Lg, Vg)

2 équations de débit pour la colonne de droite [inconnus L, V, dm(T)]

1 équation d'enthalpie pour l'ensemble du système compris entre T et T', c'est-à-dire les deux colonnes et l'ensemble des débits advantices. Soit 5 équations linéaires, 5 inconnues, on peut donc de proche en proche trouver la solution (structure des débits L, V, Lg, Vg, dm).

Dans cette façon de faire on perd de vue comment les échanges entre colonne et faisceaux de dm sont effectués. Nous cherchons maintenant à éclairer ce dernier point.

Pour y parvenir on va s'efforcer d'identifier dans le système multiétagé de la fig. 6, les systèmes monoétagés qui en sont constitutifs.

A cet effet, on établit dans le système une coupure suivant la fig. 7, qui interrompt la continuité des débits L_1, V_1, L_{1g}, V_{1g}, et on installe aux limites des deux systèmes S et S' ainsi constitués en 1, 1', 1g, 1'g, des condenseurs et évaporateurs, et on referme les débits liquides m_1, m'_1 entre colonnes homologues (fig. 8). Par hypothèse 1, 1', 1g, 1'g sont des écarts de température très faibles; les échangeurs situés de part et d'autre de la coupure (condenseurs et évaporateurs 1, 1', 1g, 1'g) ont des fonctionnements inverses. Si on recolle la coupure on retrouve la fig. 6. Si on la maintient, on voit S et S' fonctionner de la même façon (structure des débits L, V, Lg, Vg, dm, identiques à l'apparition près des débits m_1, m'_1).

Du point de vue des échanges de chaleur avec les colonnes, les débits m_1 et m^*_1, sont équivalents à:

$m^*_1 = m_1' - m_1 = L_1 - V_1$ (fig. 9)

Dans le système S, m^*_1 réchauffe la colonne 0g1g qui lui est associée; dans le système S', c'est la colonne 1'2 qui réchauffe m^*_1.

Si nous revenons au système primitif en recollant la coupure tous les éléments de notre constructions disparaissent; il reste que l'existence fictive des débits m^*_1 précédents étaient révélateurs d'une cession de chaleur de la colonne 12 à la colonne 0g1g, équivalente à la circulation en circuit fermé du caloporteur $m^*_1 = L_1 - V_1$ (voir fig. 9).

Le raisonnement que l'on vient de tenir est indépendant de tout ce qui peut se passer par ailleurs dans le système, et notamment:

La colonne 01 est certainement munie d'une source de chaleur; on va donc trouver nécessairement sur la colonne 0g1g la distribution de chaleur induite. On aura le choix entre:

La fournir directement à une utilisation,

La céder à la colonne en vis-à-vis entre les mêmes températures; dans ce cas cette distribution de chaleur sera induite une nouvelle fois sur la colonne de gauche et ainsi de suite.

Les machines multiétagés sont construites à l'aide d'un jeu de construction dont on va préciser les règles en terminant la machine qu'on a commencé.

A partir du tronçon de départ 01, (fig. 10), beaucoup de choses sont déjà déterminées et notamment:

Le tronçon inverse 0g1g.

Le tronçon direct en vis-à-vis 12. On les construit sur le diagramme de Merckel comme des marches d'escalier entre les courbes x(T) correspondant aux pressions P et Pg (fig. 11).

Toujours suivant cette construction en marches d'escalier on peut représenter la distribution de chaleur Q_o selon 00' par une suite d'inductions et d'échanges en vis-à-vis jusqu'à ce que finalement elle sorte de la colonnne de gauche (par exemple en 1g 1'g).

De même Q_2 introduite en 3g 3'g ressortira de C en 22'; le système est quadritherme; pour le rendre tritherme il faut prévoir les marches d'escalier pour que Q_o et Q_2 sortent du système dans le domaine de température prescrit pour l'utilisation.

Il n'a été décrit jusqu'ici que des machines théoriques.

On va maintenant décrire divers modes de réalisation de machines réelles. Les machines réelles se distinguent des machines théoriques par les deux points suivants:

les diagrammes de Merckel des fluides utilisés dans les machines réelles ne sont pas des diagrammes parfaits

le nombre de débits adventices est fini.

Il a été calculé, au moyen de programmes numériques, des machines trithermes réelles dans lesquelles le liquide et la vapeur évoluent légèrement hors d'équilibre pour permettre aux bilans enthalpiques d'être satisfaits.

Il en résulte un léger écart du COA réel par rapport au COA théorique (dans l'exemple ci-après 1,91 au lieu de 1,95).

Une machine réelle, dans son mode de représentation conventionnelle, apparaît dans la fig. 12 et plus en détail dans la fig. 13, tandis que la fig. 14 la représente dans une configuration de construction réelle.

Figure 12

La machine comprend une colonne Kd et une colonne Kg, fonctionnant avec un mélange de R113 et R114.

La colonne Kd reçoit de la chaleur Q_o entre les températures T_o et T'_o et fournit de la chaleur Q'_1 entre les températures T'_i et T_1.

La colonne Kg fournit de la chaleur Q''_1 entre T_{go} ($= T_{1'}$) et $T'g_o$ et reçoit de la chaleur Q_2 entre les températures $Tg_{1'} = T2$ et Tg_1.

Il existe cinq débits adventices: un premier débit m_o de Kd à T_o vers Kg à Tg_o échangeant de la chaleur à ΔT constant avec un second débit m'_o de Kg à $T'g_o$ vers Kd à T'_o

un troisième débit m_1 de Kd à T_1 ($=Tg_o$) vers Kg à $Tg_{1'}$ échangeant de la chaleur avec un quatrième débit m'_1 de Kg à Tg_1 vers Kd à T1, un cinquième débit m_m de Kg à Kd échangeant de la chaleur avec Kg de Tg_m à Tg_o et avec Kd de Tg_o ($= T_{1'}$) à Tg, Tg_m et Tg étant sensiblement les températures intermédiaires des colonnes Kg et Kd.

Figure 13

La fig. 12 établie avec les conventions établies page 9 à partir de la ligne 26. La fig. 13 explicite ce schéma en mettant en évidence les composants qui réalisent les échanges thermiques. La convention relative à l'axe des températures subsiste. On voit qu'il est nécessaire d'utiliser quatre échangeurs E_1, E_2, E_3, E_4.

Les notations indiquent que:

le débit m_o se dédouble en m^*_o et m^{**}_o

le débit m_m se dédouble en m^*_m et m^{**}_m puis m^*_{m1} et m^{**}_{m1}

le débit m_2 se dédouble en m^*_1 et m^{**}_1

avec $m^*_o = m'_o$

$m^{**}_o = m^{**}_1$

$m^{**}_m = m^{**}_1$

$m^*_1 = m'_1$

Chaque échangeur est du type à contre-courant et travaille à différence de température constante en chaque point.

Des pompes P_1, P_2, P_3 assurent la circulation des liquides.

Figure 14

La fig. 14 représente, avec ses composants sur pieds, la machine tritherme représentée schématiquement dans les fig. 12 et 13. Les conventions relatives aux axes de températures et de pesanteur sont abolies pour faire place à des conventions classiques de représentation.

On a isolé les portions de colonnes échangeant de la chaleur avec l'extérieur, à savoir:

un bouilleur B_D et un condenseur C_d pour la colonne K_d

un bouilleur B_g et un condenseur C_g pour la colonne K_g.

La colonne K_d est à haute pression (5 bars) alors que la colonne K_g est à la pression atmosphérique.

Les indications numériques à côté des bouilleurs et condenseurs correspondent à l'échange de chaleur avec l'extérieur exprimé en kilowatts.

Les flèches noires indiquent les débits liquides en litre par seconde.

Les flèches en tiretés représentent les flux vapeur.

Les températures de fonctionnement sont les suivantes:

T'_o à l'entrée du bouilleur B_d	= 85,83 °C
T_o à la sortie du bouilleur B_d	= 86,33 °C
T'_1 à l'entrée du condenseur C_d	= 60,89 °C
T_1 à la sortie du condenseur C_d	= 60,39 °C
$Tg_o = T_1$ à l'entrée du bouilleur B_g	= 60,39 °C
T'go à la sortie du bouilleur B_g	= 59,89 °C
T'g1 à l'entrée du condenseur C_g	= 34,94 °C
$Tg1 = T_2$ à la sortie du condenseur C_g	= 34,54 °C

On observe que les écarts de température aux extrémités des éléments d'échange thermique avec l'extérieur (bouilleurs, condenseurs) est de l'ordre de 0,5 degré. On utilise donc des bouilleurs et condenseurs classiques.

Les échanges internes de la machine, mettant en jeu le fluide de travail, sont les suivants:

Echangeur E_1	215 kW
Echangeur E_2	20 kW
Echangeur E_3	0,7 kW
Echangeur E_4	2,04 kW
Colonne K_d	2,84 kW
Colonne K_g	2,57 kW
Utilisation (condenseur K_d et K_g)	72 kW

Les échanges internes, dans cet exemple, sont trois fois plus élevés que la puissance d'utilisation, mais les échanges avec les colonnes sont très faibles (de l'ordre de 7%).

On voit que les machines à induction trithermes sont constituées technologiquement par l'assemblage de plusieurs types de sous-ensembles

des bouilleurs et condenseurs classiques à mélange

des échangeurs liquide-liquide à contre-courant où circule le fluide de travail liquide

des accessoires tels que pompes et laminages liquides

des dispositifs constitués par des colonnes à contact équipées d'échangeurs. Ces dispositifs sont en fait constitués par la juxtaposition en série sur le liquide et la vapeur du fluide de travail l'éléments de transfert thermique que nous avons décrits en début de ce mémoire dans ses principes. Nous décrirons ces éléments plus loin sous l'aspect de leur mode de réalisation technologique.

Les fig. 15 et 16 sont deux schémas d'une variante de réalisation de la machine.

Dans ces deux figures, les conventions relatives à l'axe unique des températures dirigé vers le bas et à l'axe de pesanteur sont reprises.

La fig. 15 montre que:

les écarts des températures des bouilleurs et des condenseurs et de 5 °C environ,

on a conservé le même nombre et la même disposition pour les débits adventices.

La fig. 16 est une représentation conventionnelle plus détaillée, dans laquelle on fait intervenir les ΔT d'échange des divers échangeurs.

On retrouve les bouilleurs, condenseurs et échangeurs de la fig. 14, mais avec les notations ci-après: E_{01}, E_{12}, E_{m1}, E_{1m}.

De plus, on adjoint à la machine:

un échangeur E_{sup} de faible puissance

un flash F à l'entrée du bouilleur B_g.

En effet, dans la partie haute température du cycle, le ΔT d'échange dans l'échangeur Q_{eo1} est égal à l'intervalle de température de bouilleur $T_o - T'_o$. De la même façon, les ΔT d'échange pour l'ensemble du cycle à haut niveau s'organisent d'eaux mêmes. A bas niveau de température, la situation des échangeurs s'inverse, car le compartiment d'échangeur réchauffant se trouve à une température inférieure à celle du compartiment réchauffé.

On corrige cette situation en utilisant un échangeur supplémentaire (de puissance faible) et en réalisant un petit flash de 5 °C du fluide de travail qui rentre dans le bouilleur Bg.

Les puissances échangées sont:

dans l'échangeur E_{01}	266 kW
dans l'échangeur E_{12}	43,6 kW
dans l'échangeur E_{n1}	25,6 kW
dans l'échangeur E_{1m}	20 kW
dans l'échangeur E_{sup}	14 kW
dans la colonne K_d	82 kW
dans la colonne K_g	73 kW
à l'utilisation (Cd+Cg)	449 + 476 kW = 925 kW

Les échanges internes par échangeurs liquide-liquide représentent environ 40% de la puissance utile; les échanges dans les colonnes représentent environ 17% de la puissance utile.

Ces deux exemples indiquent comment et avec quel ordre de grandeur l'invertalle de température des sources extérieures agissent sur les échanges internes:

Quant on se rapproche des échanges isothermes (ΔT petit), les échanges internes liquide-liquide deviennent très importants par rapport à la puissance thermique du système en même temps que les échanges avec les colonnes diphasiques deviennent évanscents.

Pour $\Delta T = 5°$, les échanges liquide-liquide internes sont faibles, cependant que les échanges avec les colonnes ne sont pas encore prohibitifs et paraissent réalisables avec des moyens technologiques existants.

Les fig. 17 et 18 illustrent un autre exemple de machine dans laquelle les sources de chaleur échangent avec l'extérieur avec un grand écart de température (de l'ordre de 11 °C). On note:

qu'il n'y a plus que quatre débits adventices; celui dénommé m_m dans les exemples précédents est devenu inutile;

que les deux colonnes K_d et K_g comprennent des parties importantes à co-courant, telles que le système vu sur pied comprendrait 4 colonnes.

Le schéma explicite fait apparaître trois échangeurs liquide-liquide de puissance:

$E_{o'1}$ = 93,96 kW
$E_{1'1}$ = 6,13 kW
$E_{11'g}$ = 28,8 kW

donc au total 195 kW, valeur devenue faible par rapport à la puissance utile 982 kW.

Examinons les échanges avec colonnes diphasiques le long des différents éléments de transfert:

00'	avec le fluide de travail	75,2 kW
	avec le caloporteur extérieur	496 kW
		571,2 kW
0'1'	avec le fluide de travail	2,28 kW
11'	avec le fluide de travail	50,74 kW
	avec le fluide caloporteur	496 kW
		549 kW
og og'	avec le fluide de travail	96,3 kW
	avec le caloporteur	486 kW
		582,3 kW
o'g 1'g	avec le fluide de travail	12 kW
	avec le fluide caloporteur	21 kW
1'g 1g	avec le fluide de travail	481 kW
		514 kW

Enfin 2281 kW sont échangés directement avec la colonne diphasique dont 1971 avec les caloporteurs extérieurs, 310 avec le fluide de travail.

On notera les conclusions ci-après:

Les intervalles de température d'échange avec les sources extérieures confèrent à la technologie des machines certains caractères contrastés:

les machines échangeant avec des sources isothermes au niveau de bouilleurs et condenseurs relativement classiques comprennent par ailleurs:

des échanges liquide-liquide importants.

des échanges dans les colonnes de faible importance.

les machines échangeant avec des caloporteurs de chaleur sensible comprenant des échanges caloporteurs-colonne tout à fait prépondérants.

A ces deux types de machine, il faudra apporter des solutions technologiques différentes pour les échanges entre colonne et caloporteurs.

Pour les machines échangeant avec des sources isothermes une colonne réalisée selon le schéma de la fig. 19 peut être utilisé.

Elle comprend un garnissage classique G (anneaux Raschig par exemple); le circuit caloporteur C_c comporte une succession de serpentins horizontaux tels que S, placés à différents niveaux directs.

Pour les machines échangeant avec des sources sensibles, qui nécessitent un échange plus important, on utilisera, de préférence, un échangeur comme celui de la fig. 20.

Le fluide diphasique circule dans des tubes T munis d'un garnissage ou d'un ressort spirale; le fluide caloporteur circule entre les tubes. On obtient ainsi un maximum de surface d'échange avec une perte de charge très faible.

Les trois exemples de réalisation qui ont été donnés en référence aux fig. 12 à 14, 15 et 16, 17 et 18 respectivement concernent des machines monoétagées dans lesquelles on fournit de l'énergie à haut niveau de température, on prélève de l'énergie d'une source à bas niveau de température (tel que nappe phréatique) et on obtient de l'énergie à température intermédiaire.

Le schéma de la fig. 21 représente une machine tritherme qui reçoit de l'énergie thermique Q_{i1}, Q_{i2} à température intermédiaire T_1, T'_1, T_1, T'_{go} et fournit des calories Q_h à haut niveau de température T_o, T'_o tout en rejetant de l'énergie Q_b à bas niveau de température T_2, T'_2. Ceci résulte de la parfaite réversibilité de la machine et des propriétés d'induction thermique qui existent dans les deux sens de fonctionnement possible.

Les fig. 22A et 22B représentent de manière schématique pour 22A, et plus détaillée pour 22B une machine multiétagée à deux colonnes; il s'agit d'une machine qui utilise un mélange d'ammoniac et d'eau. Le domaine commun de température des colonnes est 59–138,25 °C.

La colonne de droite G_d est équipée d'un bouilleur B_o recevant la chaleur (1925 kW) à haut niveau de température, d'un bouilleur B1 recevant 2300 kW du condenseur C_1 de la colonne de gauche, et d'un condenseur C'_1 cédant 2700 kW à l'utilisation à niveau thermique intermédiaire; la colonne de gauche est équipée d'un condenseur C_1 à haut niveau cédant 2300 kW au bouilleur B_1 de la colonne de droite, d'un condenseur C_2 cédant 2400 kW à l'utilisation et d'un bouilleur B_3 à bas niveau recevant 3175 kW d'une ressource à bas niveau.

Dans le schéma plus détaillé de la fig. 22B, on voit les débits adventices échangeant dans les échangeurs E_o et E_1.

On remarque la présence d'un échangeur EBC qui fait bouillir le fluide de travail de la colonne de droite et condense le fluide de travail de la colonne de gauche.

La fig. 23 est un autre mode de réalisation de machine multiétagée obtenu par superposition de deux machines monoétagées:

l'une ayant une colonne à pression P, températures T_o à T_1 et une colonne à pression Pg et températures T_1 à T_2

l'autre ayant une colonne à pression Pg et températures T_1 à T_3 et une colonne à pression P'g et températures T_3 à T_4. En pratique, T_4 est très voisin de T_2 et, en tout état de cause, on peut choisir T_3 pour que T_4 soit égal à T_2.

La première machine reçoit les chaleurs Q_1 et Q'_1 à T_o et T_2 respectivement et fournit $Q_1 + Q'_1$ à T_1.

La seconde machine reçoit Q_1 à T_1 et Q''_1 à T_2 respectivement et fournit $Q_1 + Q''_1$ à T_3.

Rien n'interdit d'inclure dans une colonne unique les deux portions de colonnes des deux machines fonctionnant entre T_1 et T_3.

On obtient la machine de la fig. 23 qui reçoit Q_1 à T_o, $Q'_1 + Q''_1$ à T_2 et fournit Q à T_1 et $Q_1 + Q''_1$ à T_3.

On a réalisé ainsi simplement une machine multiétagée.

Il est possible de réaliser sur la base des mêmes principes décrits précédemment, des machines à induction thermique avec travail extérieur.

Ce sont des machines à deux sources; le travail peut être fourni par un turbine (production d'énergie), ou absorbé par un compresseur (pompe à chaleur) suivant le sens des échanges avec les sources à haut et bas niveau.

On peut les construire en partant des schémas trithermes; partons par exemple de la fig. 24, représentant deux systèmes de transfert thermique à deux éléments chacun, induisant mutuellement l'un dans l'autre, l'un à haute pression P, l'autre à pression basse Pg.

On a figuré les échanges thermiques entre colonnes et sources extérieures, ainsi que les débits adventices. Pratiquons une coupure entre les deux éléments de chaque système comme indiqué par le trait mixte. On obtient les systèmes des fig. 25 et 26, avec en bas de la fig. 25 et en haut de la fig. 26 les flux V, Vg et L, Lg de vapeur et de liquide du fluide de travail.

Considérons la seule figure 26.

Si on referme le circuit vapeur V par une turbine Tu qui détend le gaz de P à Pg et fournissant du travail, et si on relie les flux liquide par une liaison Li échangeant de la chaleur q avec le débit adventice m_1, pour réchauffer le débit L, on obtient une machine (fig. 27) fournissant du travail extérieur (w = q) en restituant de la chaleur à bas niveau de température.

La fig. 28 est la machine inverse de la machine de la fig. 27, recevant de la chaleur Qo à bas niveau, recevant du travail W par un compresseur Co et fournissant de la chaleur Q'o = Qo + W à haut niveau de température.

C'est une pompe à chaleur.

La fig. 29 représente une pompe à chaleur où la compression s'effectue avec la vapeur circulant entre les colonnes à haut niveau, que l'on à construite en partant du schéma de la fig. 25.

La fig. 30 est la figure inverse de 26; associée à un système comme celui de la fig. 25, elle permet de construire une pompe à chaleur comme celle de la figure 31, où les effluents sont transférés d'une colonne à l'autre à niveau moyen de température.

On peut donc construire des pompes à chaleur à induction thermique avec compression à bas, moyen, ou haut niveau de température.

Le caractère général des procédés utilisés en référence aux figures 24 à 32 montre qu'on peut non seulement élaborer des pompes à chaleur, mais également obtenir du travail à partir de sources de chaleur sensible.

Les pompes à chaleurs des figures 28 et 29 ont des circuits caloporteurs dont les écarts de température ΔT sont égaux et dans la continuité l'un de l'autre.

Il est possible de séparer les caloporteurs par des écarts multiples de ΔT. Considérons la figure 32 représentant schématiquement une machine quadritherme et effectuons une coupure selon la ligne en trait mixte. On conserve la partie supérieure (figure 33); on ferme le circuit de vapeur par un compresseur Co et le circuit de liquide par une liaison Li échangeant avec le débit adventice m1 (figure 34).

On a ainsi obtenu une pompe à chaleur où les caloporteurs sont séparés de ΔT.

On pourrait en principe séparer de 2, 3, ..., n fois ΔT; mais en fait cela est irréaliste car les échanges internes du système deviennent rapidement prohibitifs. On trouvera plus loin un procédé plus économe en surfaces d'échange pour obtenir le même résultat (mais en revanche multiétagé en pression).

Les machines qu'on vient de décrire ont le même caractère de réversibilité que les machines trithermes au détail près de la compression (ou détente) humide ou surchauffée. Si l'on utilise comme fluide de travail un mélange du type R112 + R113, on peut dans une certaine mesure choisir le long des colonnes un point de transfert de la vapeur (à bas, moyen, ou haut niveau) pour que l'état de la vapeur à la réinjection soit à peu près saturant. Par ailleurs, leur fonctionnement à le même caractère de rigidité au point nominal; cependant, dès lors qu'on s'autorise non plus seulement à échanger entre les colonnes des débits adventices de liquide, mais qu'on recourt également à des transports de vapeur, on peut construire des configurations de machines réversibles au point nominal, capable d'associer des circuits caloporteurs quelconque; la fig. 35 en donne un exemple.

Les machines à induction thermique à travail extérieur qu'on a examinées jusqu'ici ne comportent que deux colonnes.

Les machines qu'on a étudiées jusqu'ici ne comportaient que deux colonnes; on peut envisager des morphologies qui en comportent un nombre supérieur.

La fig. 36 représente une telle réalisation; on reconnait à droite de cette figure une machine identique à celle de la fig. 28, fonctionnant entre P0 et P1; elles transfère Q'_o au niveau des colonnes Cgo et C_1 à une machine de même type fonctionnant entre P_1 et P_2; Cgo et C_1 fonctionnant à même pression P_1 et entre les mêmes températures T_1 et T_2 peuvent être superposées (fig. 37): l'ensemble Cgo, C_1, M'_o fait place à la colonne C'_1 dont le fonctionnement résulte de la superposition des colonnes directe et inverse C_o et C_1, respectivement d'activité thermique Q_o et Q'_o; l'activité thermique de C'_1 est donc Q_o–Q'_o; c'est donc une activité faible et C'_1 est une petite colonne auxiliaire.

Un autre exemple fig. 38 et 39; mêmes dispositions que précédemment; de plus le caloporteur m_o réchauffe C_1; la colonne C'_1 (fig. 39) est le siège de l'activité thermique $2Q_o$–$Q'_o = Q_o$+q1.

Il est commode de représenter les machines multiétagées sur des diagrammes où l'on porte en abscisse la pression, la température vers le bas (comme d'habitude); les isocentrations x = constante sont telles que représentées fig. 40.

On peut généraliser les dispositions de la fig. 39 à une machine à 4 étages (fig. 41) ou à six étages (fig. 42). On a figuré dans les dessins les axes de

pression et de température. Le cycle est un cycle sans flash de production d'énergie à partir de ressources de chaleur sensible (par exemple géothermales).

Revendications

1. Pompe à chaleur, comprenant

un premier ensemble comportant une colonne de distillation (K_d) fonctionnant par contact diphasique avec un fluide de travail constitué de deux corps purs miscibles, à une première valeur de pression et dans un premier domaine de température

et un second ensemble avec une seconde colonne (K_g) à contact diphasique fonctionnant à une seconde pression de valeur inférieure à la première, et dans un deuxième domaine de température,

le premier ensemble comprenant, associés à la colonne de distillation, un premier bouilleur (B_d) et un premier condenseur (C_d),

le second ensemble comprenant, associés à ladite seconde colonne, un second bouilleur (B_g) et un second condenseur (C_g),

une première paire de débits étant établie entre le premier bouilleur et le second condenseur,

une seconde paire de débits étant établie entre le premier condenseur et le second bouilleur,

au moins un débit liquide entre deux sections intermédiaires de mêmes concentrations des deux colonnes étant établi par soutirage dans la deuxième colonne et injection dans la première,

tous les débits établis échangeant entre eux et avec les colonnes de la chaleur de manière que les échanges soient en équilibre et que chaque colonne reçoive en tout point la chaleur correspondant à la condition de réversibilité,

la température des condenseurs des deux ensembles étant approximativement la même,

les bouilleurs étant respectivement disposés à l'extrémité la plus chaude de la colonne de distillation et à l'extrémité la plus froide de la seconde colonne et reçoivant de la chaleur de sources extérieures, les condenseurs fournissant de la chaleur à des utilisations extérieures.

2. Pompe à chaleur selon la revendication 1, caractérisé en ce que:

la première paire de débits échange de la chaleur dans un premier échangeur (E1) à contre-courant,

la seconde paire échange de la chaleur dans un second échangeur (E2) à contre-courant,

ledit débit liquide entre deux sections intermédiaires comprenant une troisième paire de débits reliant sensiblement le milieu de la première colonne (K_d) au second condenseur et échangeant de la chaleur dans un troisième échangeur (E3) à contre-courant et une quatrième paire de débits reliant sensiblement le milieu de la seconde colonne (K_g) au premier condenseur et échangeant de la chaleur dans un quatrième échangeur (E4) à contrecourant.

3. Dispositif pour valoriser de la chaleur à bas niveau de température en fournissant de la chaleur à un niveau de température supérieure comprenant

un premier ensemble comportant une colonne de distillation (K_d) fonctionnant par contact diphasique avec un fluide de travail constitué de deux corps purs miscibles, à une première valeur de pression et dans un premier domaine de température,

et un second ensemble avec une seconde colonne (K_g) à contact diphasique fonctionnant à une seconde pression de valeur inférieure à la première, et dans un deuxième domaine de température,

le premier ensemble comprenant, associés à la colonne de distillation un premier bouilleur (B_d) et un premier condenseur (C_d),

le second ensemble comprenant associés à ladite seconde colonne, un second bouilleur (B_g) et un second condenseur (C_g),

une première paire de débits étant établie entre le premier bouilleur et le second condenseur,

une seconde paire de débits étant établie entre le premier condenseur et le second bouilleur,

au moins un débit liquide entre deux sections intermédiaires de mêmes concentrations des deux colonnes étant établi par soutirage dans la deuxième colonne et injection dans la première,

tous les débits établis échangeant entre eux et avec les colonnes de la chaleur de manière que les échanges soient en équilibre et que chaque colonne reçoive en tout point la chaleur correspondant à la condition de réversibilité,

la température des bouilleurs des deux ensembles étant approximativement la même,

les condenseurs étant respectivement disposés à l'extrémité la plus chaude de la première colonne et à l'extrémité la plus froide de la seconde colonne,

les bouilleurs reçoivant de la chaleur de sources extérieures,

les condenseurs fournissant de la chaleur à des utilisations extérieures.

4. Dispositif selon la revendication 3, caractérisé en ce que la première paire de débits échange de la chaleur dans un premier échangeur (E1) à contre-courant, la seconde paire de débits échange de la chaleur dans un second échangeur (E2) à contre-courant, ledit débit liquide entre deux sections intermédiaire comprenant une troisième paire reliant sensiblement le milieu de la première colonne au second condenseur et échangeant de la chaleur dans un troisième échangeur (E_3) à contre-courant et une quatrième paire reliant sensiblement le milieu de la seconde colonne au premier condenseur et échangeant de la chaleur dans un quatrième échangeur (E_4) à contre-courant.

5. Pompe à chaleur selon la revendication 1, caractérisée en ce qu'au moins un bouilleur ou un condenseur associé à une colonne est relié à un circuit de prélèvement de vapeur qui transporte de la vapeur au condenseur ou au bouilleur de l'autre colonne ledit circuit comprenant un organe (Tu, Co) pour porter la pression de la vapeur de sa valeur ou point de prélèvement à sa valeur au point de réinjection dans ladite colonne, la pompe

comprenant une moyen (L_i) pour établir un débit liquide entre lesdits points de prélèvement et de réinjection de vapeur, de manière à obtenir l'égalité des débits liquides dans les sections de mêmes concentrations des colonnes.

6. Dispositif selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'au moins un bouilleur ou un condenseur associé à une colonne est relié à un circuit de prélèvement de vapeur qui transporte de la vapeur au condenseur ou au bouilleur de l'autre colonne, ledit circuit comprenant un organe (Tu, Co) pour porter la pression de sa valeur au point de prélèvement à sa valeur au point de réinjection dans ladite colonne, le dispositif comprenant un moyen (L_i) pour établir un débit liquide entre lesdits points de prélèvement et de réinjection de vapeur, de manière à obtenir l'égalité des débits liquides dans les sections de mêmes concentrations des colonnes.

Patentansprüche

1. Wärmepumpe mit

einer ersten Einheit, die eine Destillationssäule (K_d) besitzt, welche aufgrund eines Zweiphasenkontakts mit einem Arbeitsfluid arbeitet, wobei dieses Fluid aus zwei reinen mischbaren Stoffen besteht und die Destillation bei einem ersten Druck und einem ersten Temperaturbereich abläuft,

und mit einer zweiten Einheit, die eine zweite Säule (K_g) besitzt, die im Zweiphasenkontakt bei einem zweiten Druck unterhalb des ersten und in einem zweiten Temperaturbereich arbeitet,

wobei die erste Einheit einen ersten Verdampfer (B_d) und einen ersten Kondensator (C_d) aufweist, die der Destillationssäule zugeordnet sind,

wobei die zweite Einheit einen zweiten Verdampfer (B_g) und einen zweiten Kondensator (C_g) aufweist, die der zweiten Säule zugeordnet sind,

wobei ein erstes Paar von Strömen zwischen dem ersten Verdampfer und dem zweiten Kondensator geschaffen wird,

wobei ein zweites Paar von Strömen zwischen dem ersten Kondensator und dem zweiten Verdampfer geschaffen wird,

wobei mindestens ein Flüssigkeitsstrom zwischen zwei Zwischenquerschnitten gleicher Konzentrationen der beiden Säulen durch Abzug aus der zweiten Säule und Einspeisung in die erste Säule geschaffen wird,

wobei alle so geschaffenen Ströme untereinander und mit den Säulen Wärme austauschen, so dass die Wärmeaustauschvorgänge im Gleichgewicht sind und jede Säule in jedem Punkt die der Umkehrbarkeitsbedingung entsprechende Wärmemenge zugeführt erhält,

wobei die Temperatur der Kondensatoren der beiden Einheiten ungefähr dieselbe ist,

wobei die Verdampfer am heissen Ende der Destillationssäule bzw. am kalten Ende der zweiten Säule sitzen und Wärme von äusseren Quellen zugeführt erhalten und die Kondensatoren Wärme an äussere Verbraucher liefern.

2. Wärmepumpe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass

das erste Paar von Strömen Wärme in einem ersten Wärmetauscher (E1) nach dem Gegenstromprinzip austauscht,

das zweite Paar Wärme in einem zweiten Wärmetauscher (E2) nach dem Gegenstromprinzip austauscht,

wobei der Flüssigkeitsstrom zwischen zwei Zwischenquerschnitten ein drittes Paar von Strömen aufweist, die praktisch die Mitte der ersten Säule (K_g) mit dem zweiten Kondensator verbinden und Wärme in einem dritten Wärmetauscher (E3) nach dem Gegenstromprinzip austauschen, und ein viertes Paar von Strömen aufweist, die praktisch die Mitte der zweiten Säule (K_g) mit dem ersten Kondensator verbinden und Wärme in einem vierten Wärmetauscher (E4) nach dem Gegenstromprinzip austauschen.

3. Vorrichtung zur Ausnutzung von Wärme bei niedrigem Temperaturniveau, indem sie Wärme auf höherem Temperaturniveau liefert,

mit einer ersten Einheit, die eine Destillationssäule (K_d) aufweist, welche durch Zweiphasenkontakt mit einem von zwei reinen mischbaren Stoffen gebildeten Arbeitsfluid bei einem ersten Druck und in einem ersten Temperaturbereich arbeitet,

und mit einer zweiten Einheit, die eine zweite Säule (K_g) besitzt, welche im Zweiphasenkontakt bei einem zweiten Druck niedrigeren Werts als der erste und in einem zweiten Temperaturbereich arbeitet,

wobei die erste Einheit in Zuordnung zur Destillationssäule einen ersten Verdampfer (B_d) und einen ersten Kondensator (C_d) aufweist,

wobei die zweite Einheit in Zuordnung zur zweiten Säule einen zweiten Verdampfer (B_g) und einen zweiten Kondensator (C_g) aufweist,

wobei ein erstes Paar von Strömen zwischen dem ersten Verdampfer und dem zweiten Kondensator geschaffen wird,

wobei ein zweites Paar von Strömen zwischen dem ersten Kondensator und dem zweiten Verdampfer geschaffen wird,

wobei mindestens ein Flüssigkeitsstrom zwischen zwei Zwischenquerschnitten gleicher Konzentrationen der beiden Säulen durch Abzapfung aus der zweiten Säule und Einspeisung in die erste geschaffen wird,

wobei alle so geschaffenen Ströme untereinander und mit den Säulen Wärme austauschen, so dass die Austauschvorgänge im Gleichgewicht sind und jede Säule in jedem Punkt die der Umkehrbarkeitsbedingung entsprechende Wärme zugeführt erhält,

wobei die Temperatur der Verdampfer der beiden Einheiten im wesentlichen dieselbe ist,

wobei die Kondensatoren am heissen Ende der ersten Säule bzw. am kalten Ende der zweiten Säule angeordnet sind,

wobei die Verdampfer Wärme von äusseren Quellen zugeführt erhalten,

wobei die Kondensatoren Wärme an äussere Verbraucher liefern.

4. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Paar von Strömen Wärme in einem ersten Wärmetauscher (E1) nach dem Gegenstromprinzip austauscht, dass das zweite Paar von Strömen Wärme in einem zweiten Wärmetauscher (E2) nach dem Gegenstromprinzip austauscht, wobei der Flüssigkeitsstrom zwischen zwei Zwischenquerschnitten ein drittes Paar, das praktisch die Mitte der ersten Säule mit dem zweiten Kondensator verbindet und Wärme in einem dritten Wärmetauscher (E3) nach dem Gegenstromprinzip austauscht, und ein viertes Paar aufweist, das praktisch die Mitte der zweiten Säule mit dem ersten Kondensator verbindet und Wärme in einem vierten Wärmetauscher (E4) nach dem Gegenstromprinzip austauscht.

5. Wärmepumpe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Verdampfer oder ein Kondensator, der einer Säule zugeordnet ist, an einen Dampfabzugskreis angeschlossen ist, der Dampf zum Kondensator oder Verdampfer der anderen Säule fördert, wobei dieser Kreis ein Organ (Tu, Co) besitzt, um den Dampfdruck von seinem Abzugspunkt auf seinen Einspeisepunkt in die Säule zu bringen, wobei die Pumpe ein Mittel (L_i) aufweist, um einen Flüssigkeitsstrom zwischen diesen Dampfentnahme- und wiedereinspeisepunkten zu schaffen, so dass Gleichheit der Flüssigkeitsströme in den Querschnitten gleicher Konzentrationen der Säulen erhalten wird.

6. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Verdampfer und ein Kondensator, der einer Säule zugeordnet ist, mit einem Dampfentnahmekreis verbunden ist, der Dampf zum Kondensator oder zum Verdampfer der anderen Säule fördert, wobei dieser Kreis ein Organ (Tu, Co) aufweist, um den Druck von seinem Entnahmepunkt auf den Druck am Wiedereinspeisepunkt in die Säule zu bringen, wobei die Vorrichtung ein Mittel (L_i) aufweist, um einen Flüssigkeitsstrom zwischen diesen Dampfentnahme- und -wiedereinspeisungspunkten zu schaffen, so dass Gleichheit der Flüssigkeitsströme in den Querschnitten gleicher Konzentrationen der Säulen erzielt wird.

Claims

1. A heat pump comprising

a first assembly including a distillation column (K_d) operating by diphasic contact with a working fluid constituted of two pure mixable substances, at a first pressure and in a first temperature range,

and a second assembly including a second column (K_g) operating by biphase contact at a second pressure of lower magnitude than the first and in a second temperature range,

the first assembly comprising a first distiller (B_d) and a first condenser (C_d) in association with the distillation column,

the second assembly comprising a second distiller (B_g) and a second condenser (C_g) in association with the second column,

a first pair of flows being established between the first distiller and the second condenser,

a second pair of flows being established between the first condenser and the second distiller,

at least one liquid flow between two intermediate sections of identical concentrations in both columns being established by extraction from the second column and injection into the first one,

all the established flows exchanging heat mutually and with the columns, such that the exchanges are balanced and that each column receives in each point a heat quantity corresponding to the reversibility condition,

the temperature of the condensers of both assemblies being approximately the same,

the distillers being respectively disposed at the hot end of the distillation column and at the cold end of the second column and receiving heat from external sources, the condensers supplying heat to external uses.

2. A heat pump according to claim 1, characterized in that:

the first pair of exchange flows exchanges heat in a first counter-current exchanger (E1),

the second pair exchanges heat in a second counter-current exchanger (E2),

said liquid flow between two intermediate sections comprising a third pair of flows practically linking the center of the first column (K_d) to the second condenser and exchanging heat in a third counter-current exchanger (E3), and a fourth pair of flows linking practically the center of the second column (Kg) to the first condenser and exchanging heat in a fourth counter-current exchanger (E4).

3. A device for valorizing heat at a low temperature level and supplying heat at a higher temperature level, comprising

a first assembly including a distillation column (K_d) operating by diphasic contact with a working fluid constituted of two pure mixable substances, at a first pressure and in a first temperature range,

and a second assembly including a second column (K_g) operating by biphase contact at a second pressure of lower magnitude than the first and in a second temperature range,

the first assembly comprising a first distiller (B_d) and a first condenser (C_d) in association with the distillation column,

the second assembly comprising a second distiller (B_g) and a second condenser (C_g) in association with the second column,

a first pair of flows being established between the first distiller and the second condenser,

a second pair of flows being established between the first condenser and the second distiller,

at least one liquid flow between two intermediate sections of identical concentrations in both column being established by extraction from the second column and injection into the first one,

all the established flows exchanging heat mutually and with the columns, such that the exchanges are balanced and that each column receives in each point a heat quantity corresponding to the reversibility condition,

the temperature of the condensers of both assemblies being approximately the same,

the condensers being respectively disposed at the hot end of the first column and at the cold end of the second column

the distillers receiving heat from external sources,

the condensers supplying heat to external uses.

4. A device according to claim 3, characterized in that the first pair of flows exchanges heat in a first counter-flow exchanger (E1), the second pair of flows exchanges heat in a second counter-flow exchanger (E2), said liquid flow between intermediate sections including a third pair practically linking the center of the first column to the second condenser and exchanging heat in a third counter-flow exchanger (E3), and a fourth pair, pratically linking the center of the second column to the first condenser and exchanging heat in a fourth counter-flow exchanger (E4).

5. A heat pump according to claim 1, characterized in that at least one distiller or one condenser associated to a column is linked to a vapour extraction circuit which transmits the vapour to the distiller or condenser of the other column, the said circuit comprising a mechanism (Tu, Co) bringing the pressure of the vapour from its value at the extraction point to its value at the reinjection point into said column, the heat pump comprising a means (L_i) of establishing a liquid flow between the said vapour extraction and reinjection points, so as to obtain equality of the liquid flows in the sections of the same concentrations in the associated columns.

6. A device according to claim 3, characterized in that at least one distiller or condenser associated to a column is linked to a vapour extraction circuit which transmits the vapour to the condenser or distiller of the other column, the said circuit comprising a mechanism (Tu, Co) bringing the pressure of the vapour from its value at the extraction point to its value at the reinjection point into said column, the device comprising a means (L_i) of establishing a liquid flow between the said vapour extraction and reinjection points, so as to obtain equality of the liquid flows in the sections of the same concentrations in the associated columns.

FIG. 1

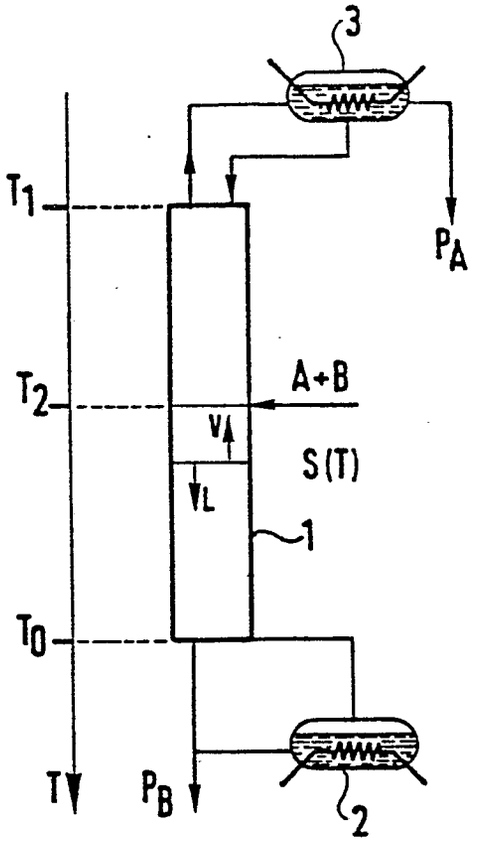


FIG. 2

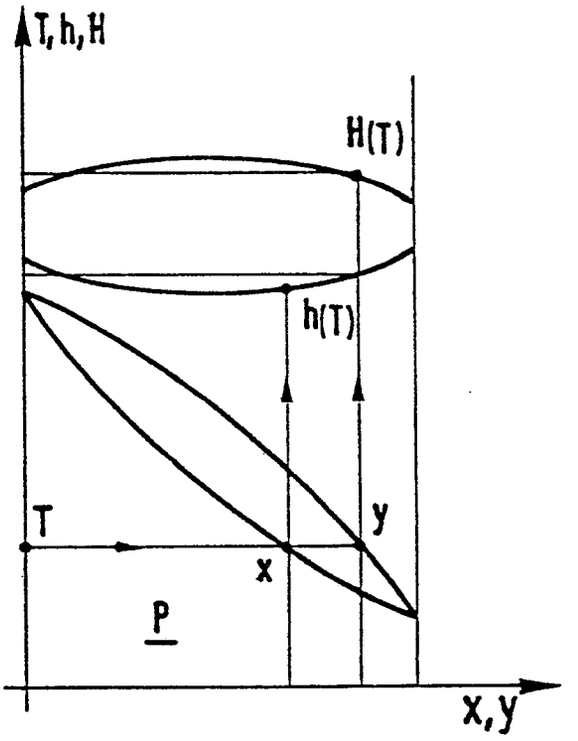


FIG. 3

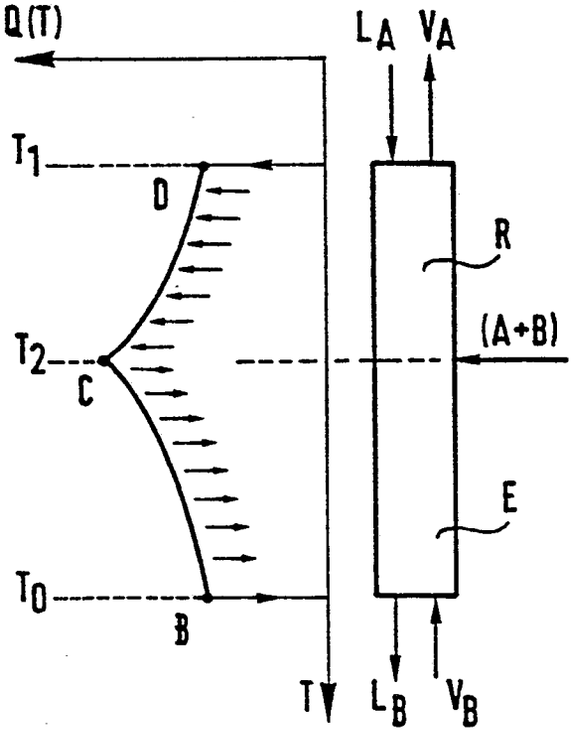


FIG. 4

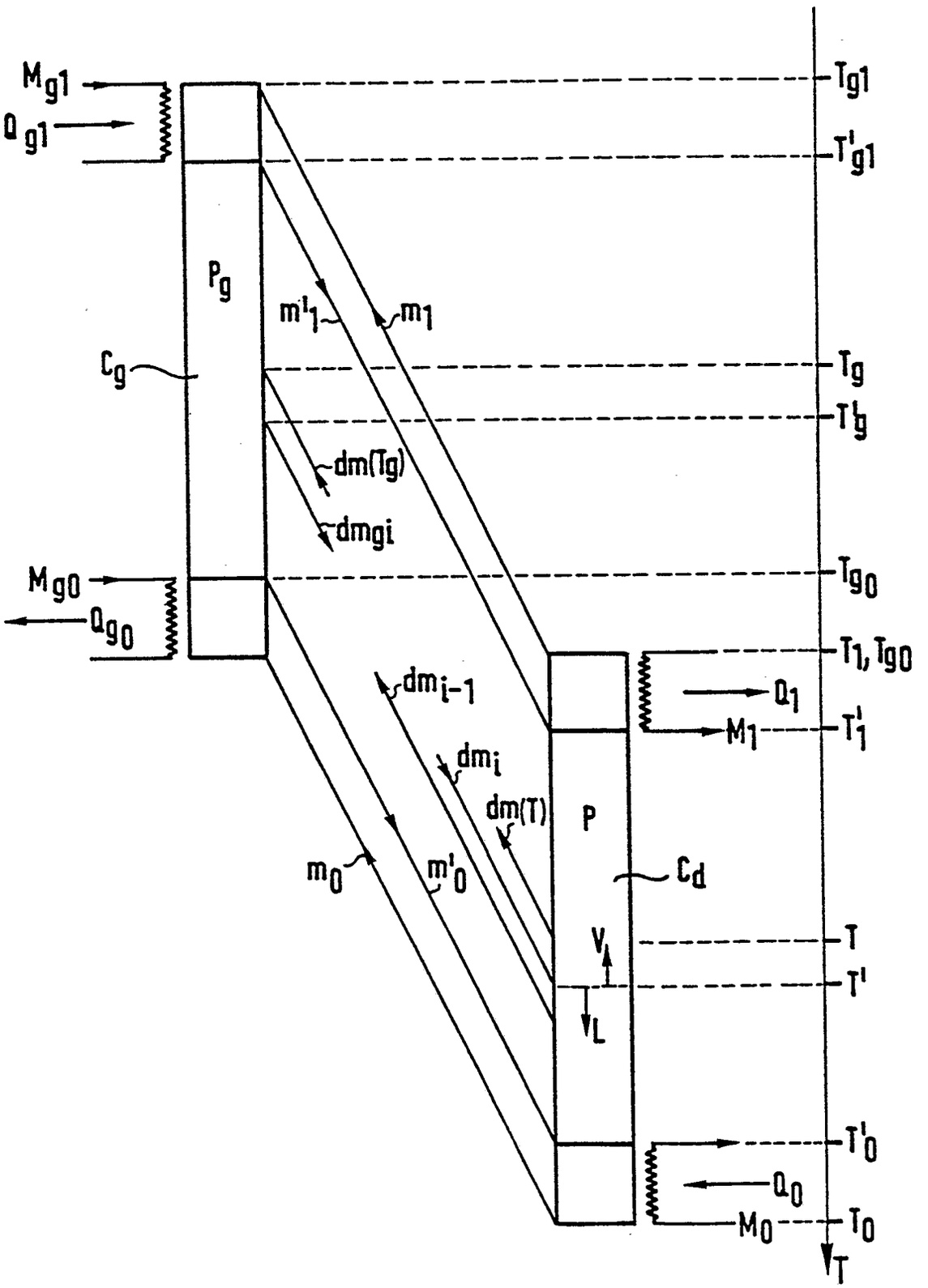

Mg1
Qg1
Pg
Cg
m'1
m1
dm(Tg)
dmgi
Mg0
Qg0
dmi-1
dmi
dm(T)
m0
m'0
P
Cd
V
L
Tg1
T'g1
Tg
T'g
Tg0
T1, Tg0
Q1
M1
T'1
T
T'
T'0
Q0
M0
T0
T

FIG. 5

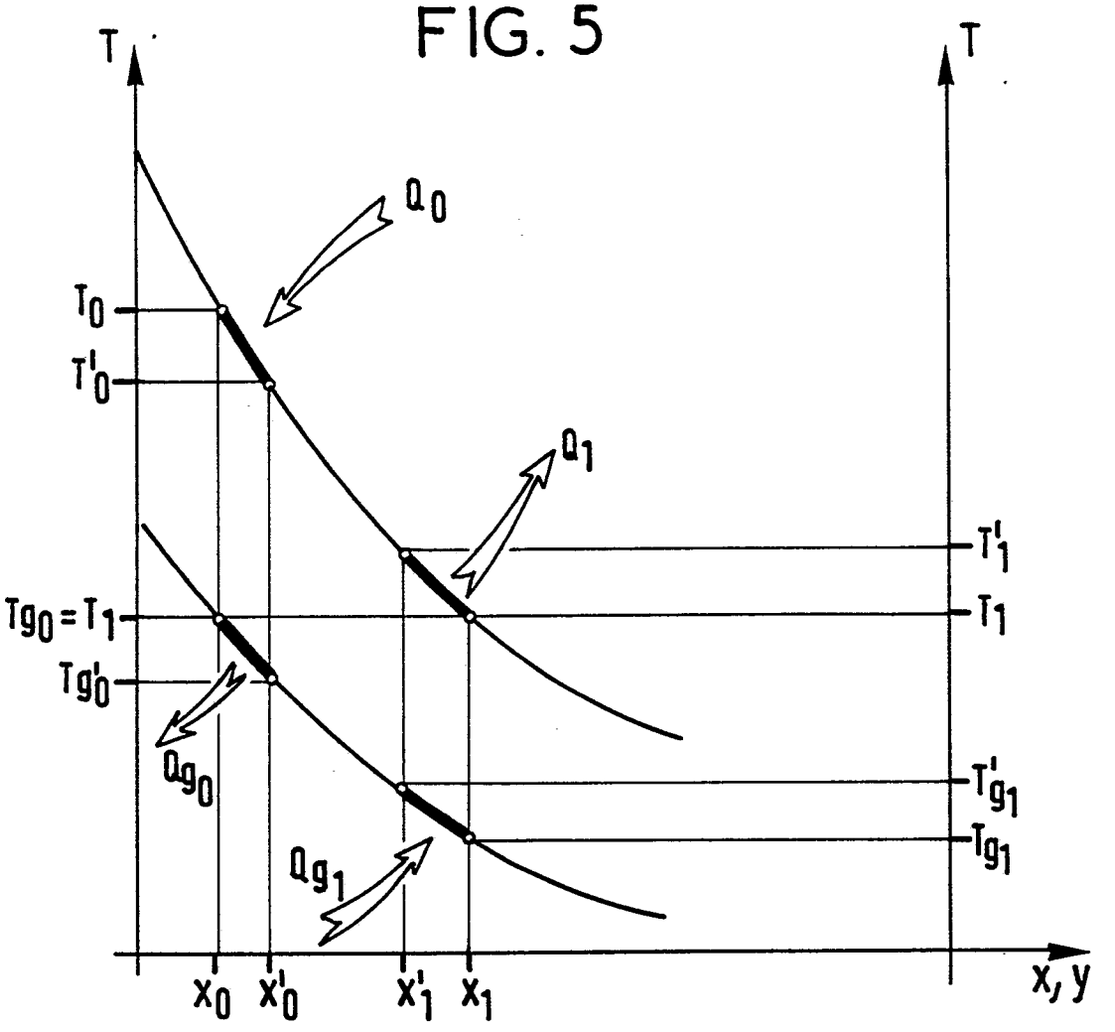


FIG. 6

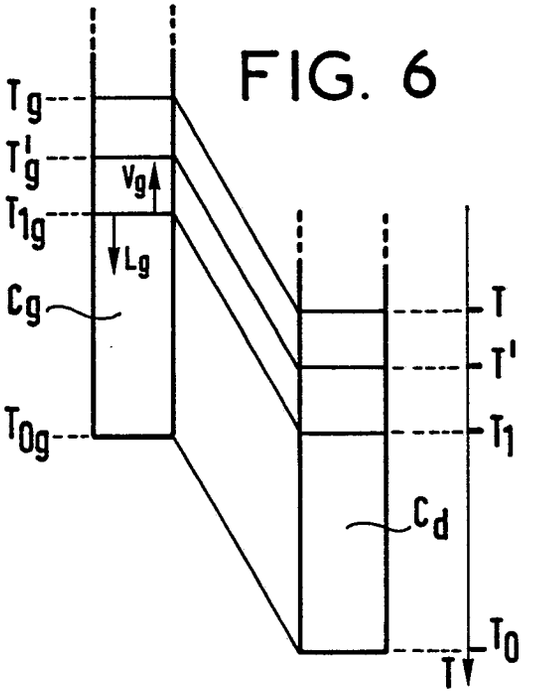


FIG. 7

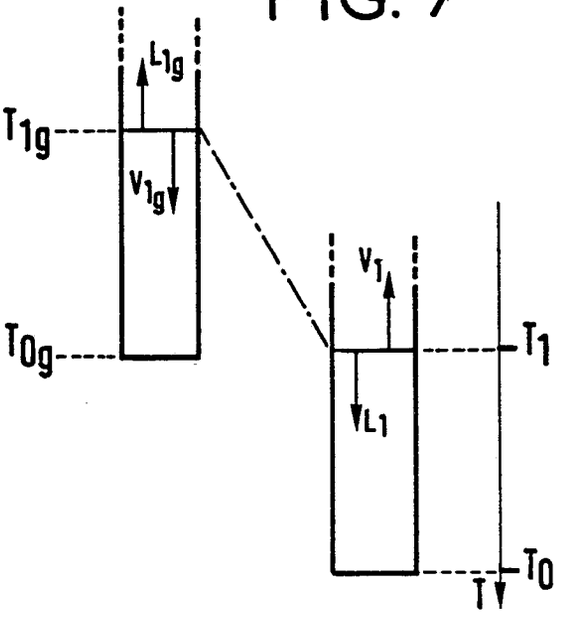


FIG. 8

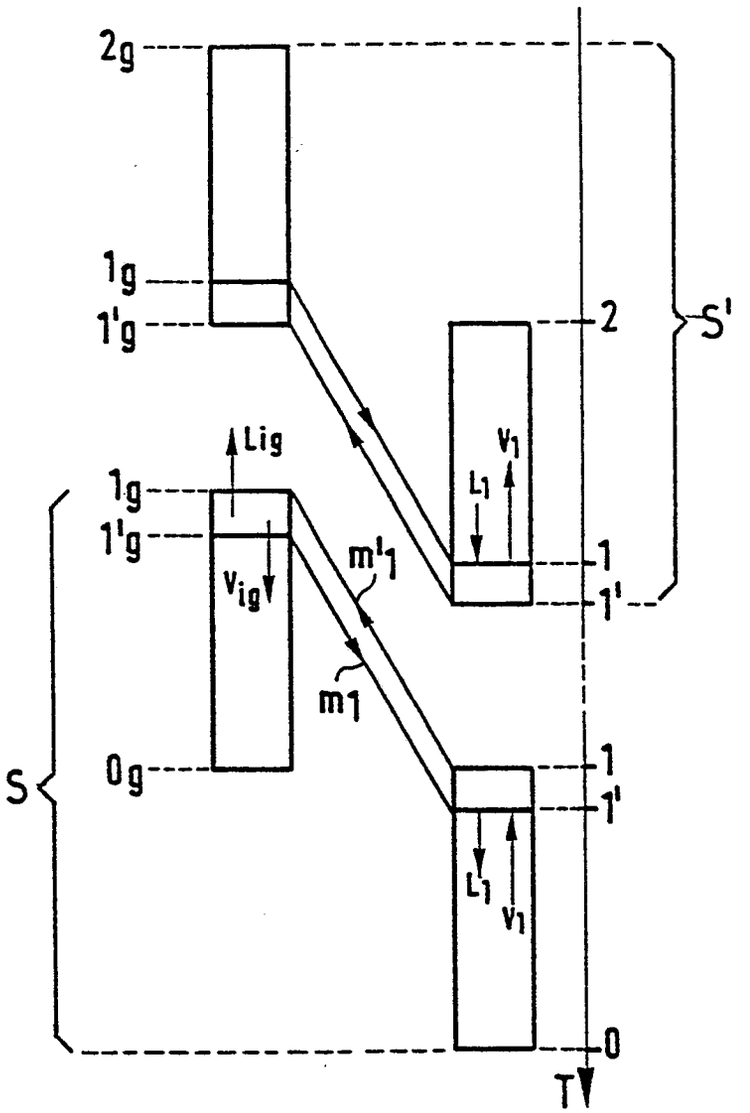

2g
1g
1'g
2
S'
Lig
V1
L1
1g
1'g
m'1
Vig
1
1'
m1
S
0g
1
1'
L1
V1
0
T

FIG. 9

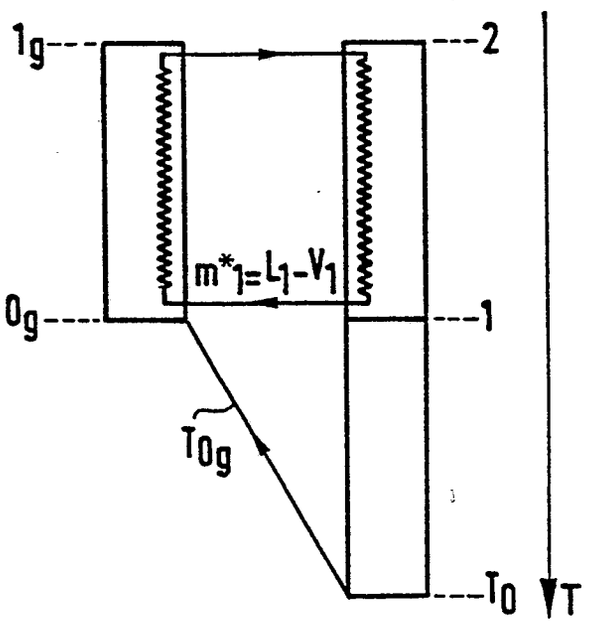

1g
2
m*1=L1-V1
0g
1
T0g
T0
T

FIG. 10

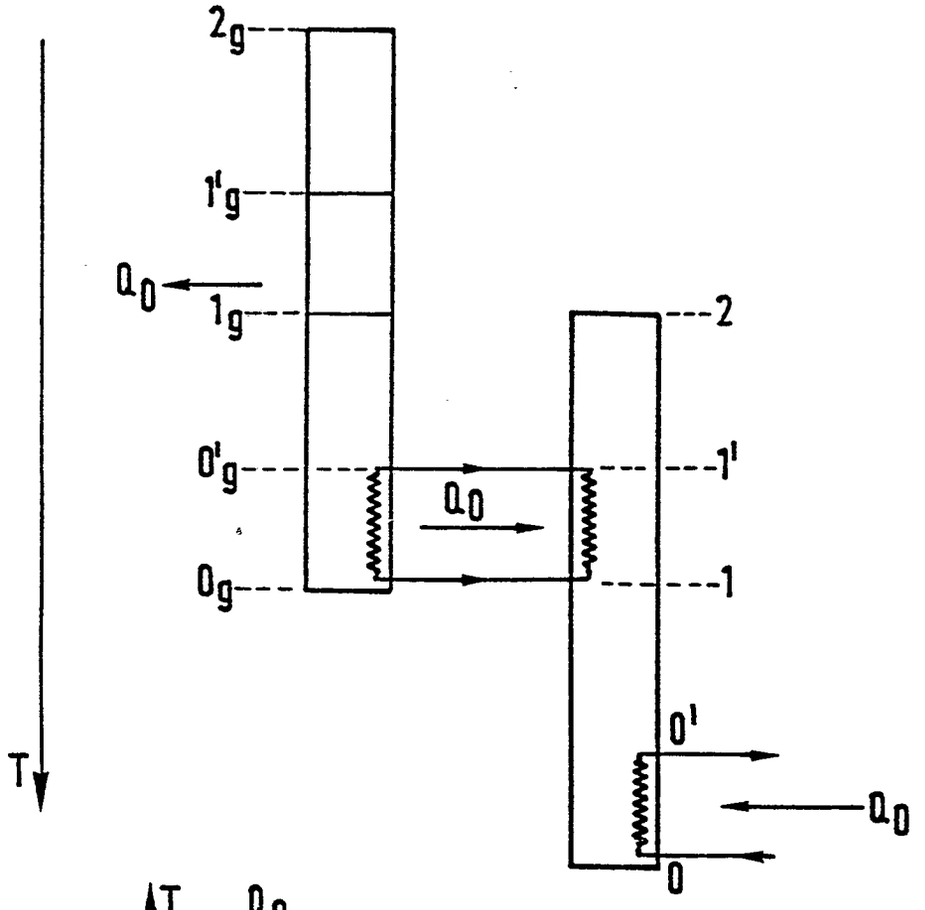

2g
1'g
Q0
1g
0'g
0g
T
Q0
2
1'
1
0'
Q0
0

FIG. 11

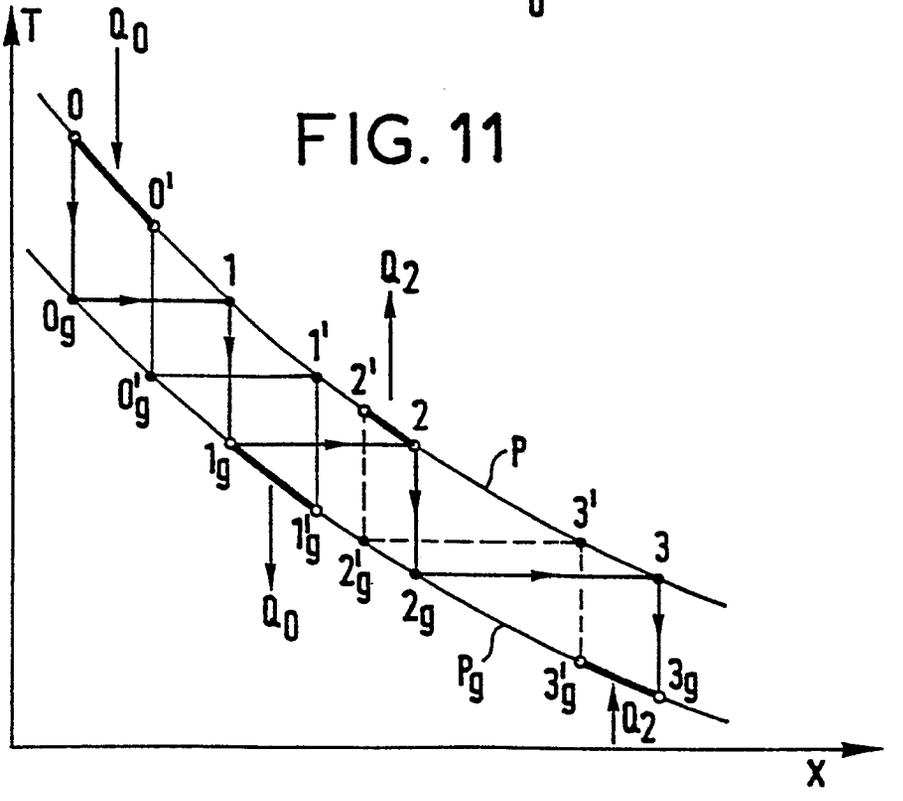

T
Q0
0
0'
1
Q2
0g
1'
2'
0'g
2
1g
P
3'
3
1'g
2'g
2g
Q0
Pg
3'g
3g
Q2
X

FIG. 12

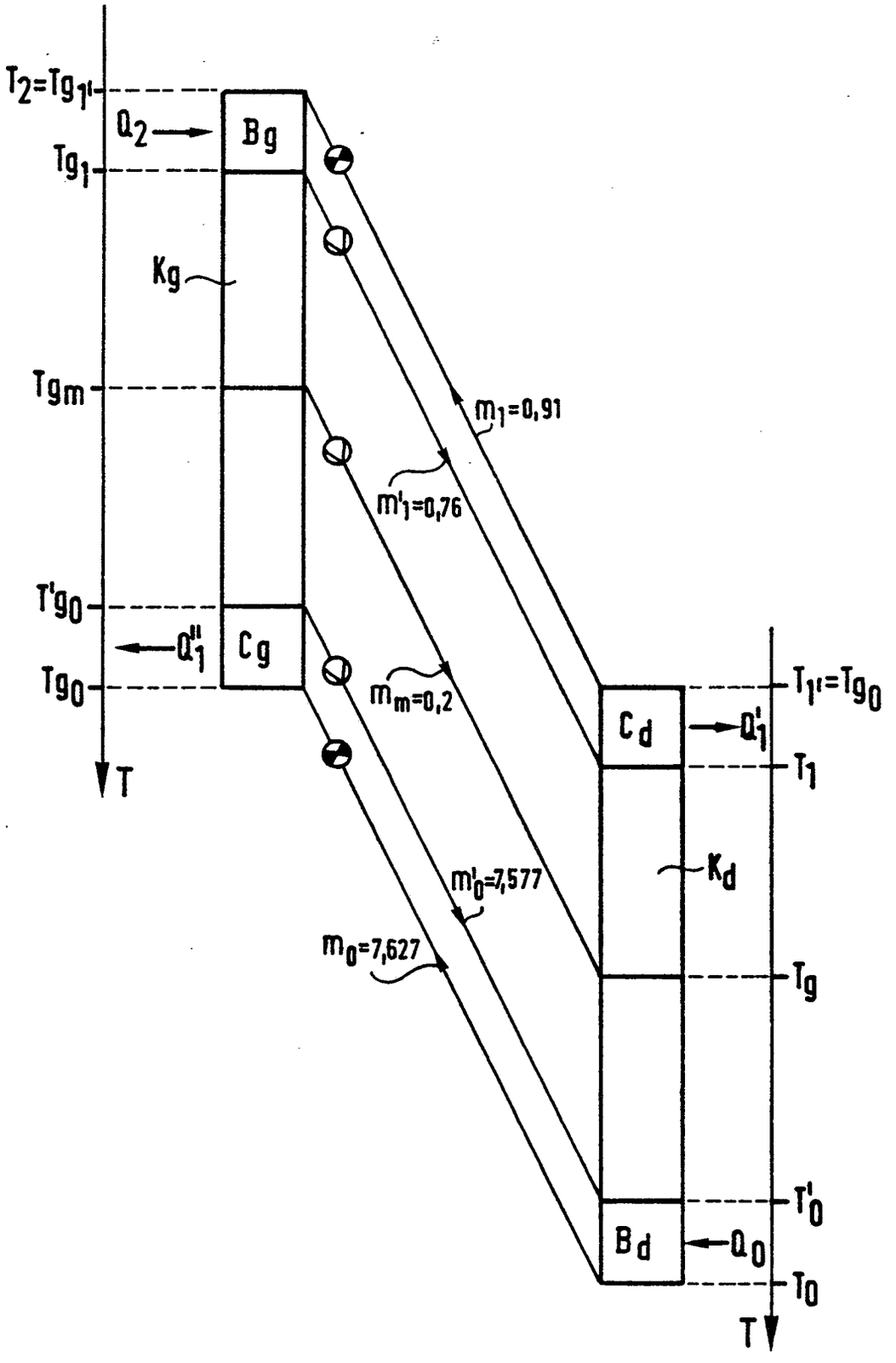

T2=Tg1'
Q2
Bg
Tg1
Kg
Tgm
T'g0
Q''1
Cg
Tg0
T
m1=0,91
m'1=0,76
mm=0,2
m'0=7,577
m0=7,627
T1'=Tg0
Cd
Q'1
T1
Kd
Tg
T'0
Bd
Q0
T0
T

FIG.13

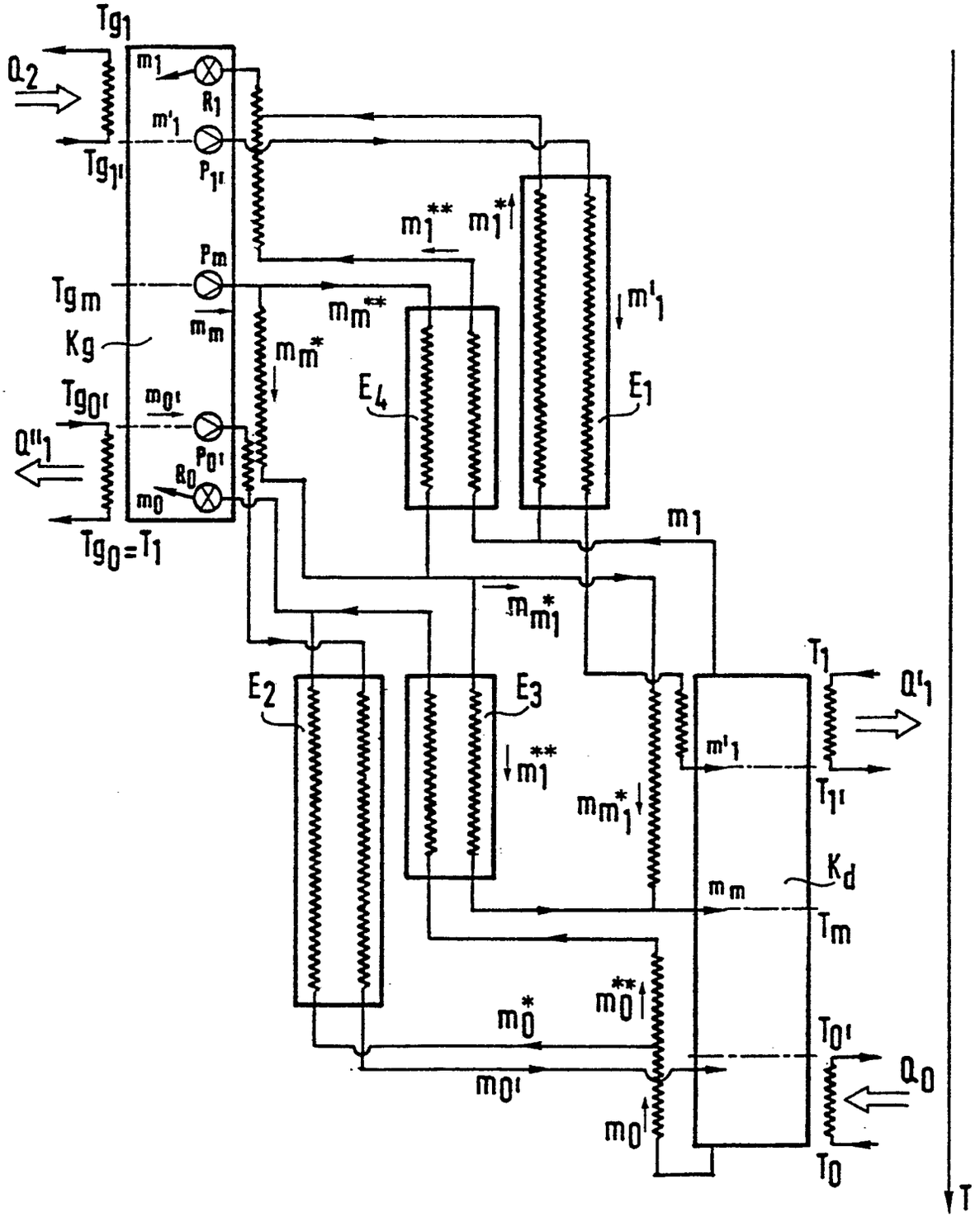

Tg1
Q2
m1
R1
m'1
P1'
Tg1'
Pm
Tgm
mm
Kg
mm*
mm**
m1**
m1*
m'1
E4
E1
Tg0'
m0'
P0'
Q''1
R0
m0
Tg0=T1
m1
mm1*
E2
E3
m1**
mm1*
T1
Q'1
m'1
T1'
mm
Kd
Tm
m0*
m0**
T0'
Q0
m0'
m0
T0
T

FIG.14

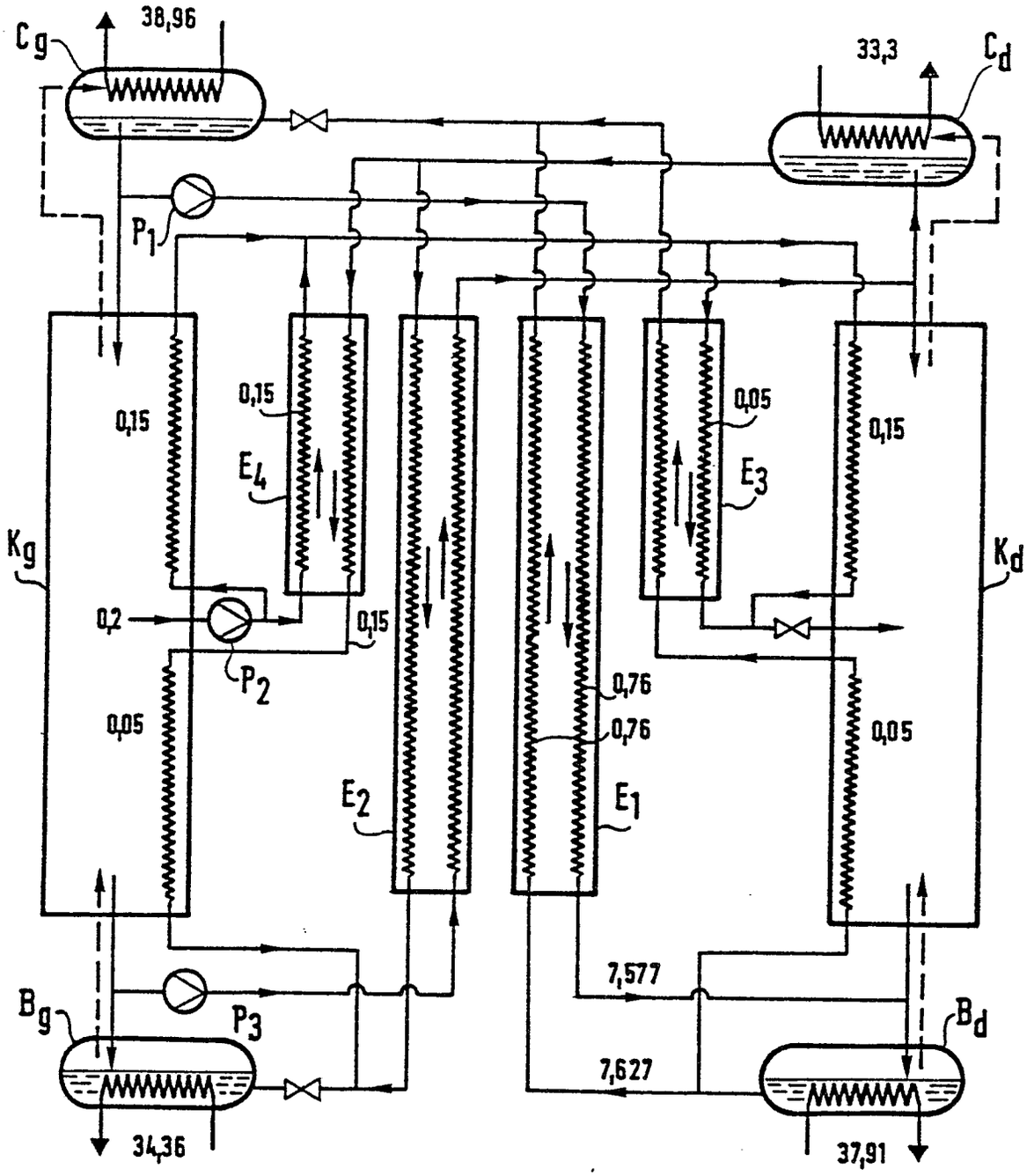
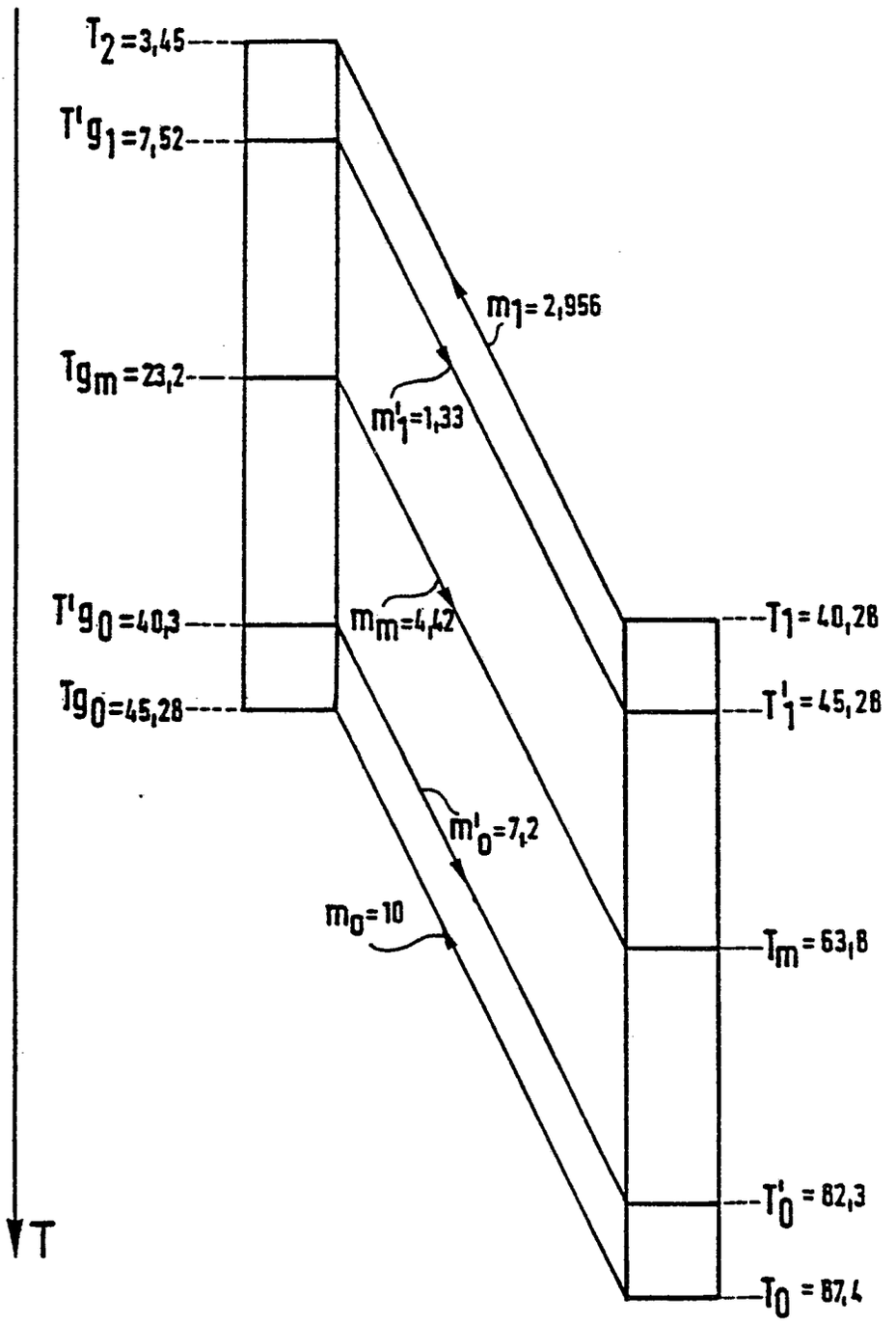

Cg
38,96
33,3
Cd
P1
0,15
0,15
E4
0,05
E3
0,15
Kg
Kd
0,2
0,15
P2
0,05
0,76
0,76
0,05
E2
E1
7,577
Bg
P3
Bd
7,627
34,36
37,91

FIG. 15


T2=3,45
T'g1=7,52
Tgm=23,2
T'g0=40,3
Tg0=45,28
T
m1=2,956
m'1=1,33
mm=4,42
m'0=7,2
m0=10
T1=40,28
T'1=45,28
Tm=63,18
T'0=82,3
T0=87,4

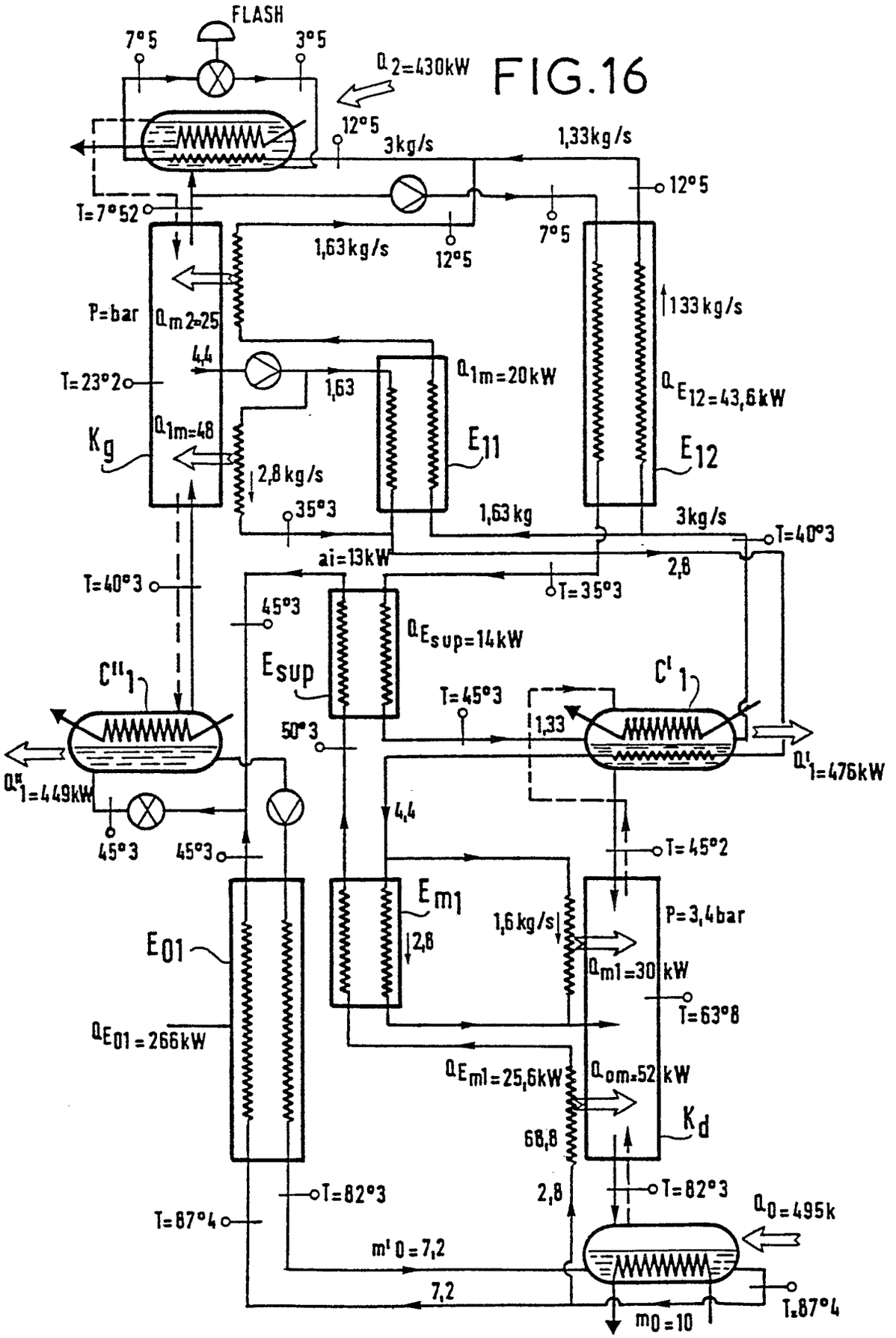

FLASH
7°5
3°5
Q2=430kW
12°5
3kg/s
1,33kg/s
12°5
T=7°52
1,63kg/s
12°5
7°5
P=bar
Qm2=25
133kg/s
4,4
T=23°2
1,63
Q1m=20kW
QE12=43,6kW
Q1m=48
Kg
E11
E12
2,8kg/s
35°3
1,63kg
3kg/s
T=40°3
ai=13kW
2,8
T=40°3
T=35°3
45°3
QEsup=14kW
Esup
C"1
T=45°3
C'1
50°3
1,33
Q'1=476kW
Q"1=449kW
4,4
45°3
45°3
T=45°2
Em1
1,6kg/s
P=3,4bar
E01
2,8
Qm1=30 kW
T=63°8
QE01=266kW
QEm1=25,6kW
Qom=52 kW
68,8
Kd
T=82°3
2,8
T=82°3
T=87°4
Q0=495k
m'0=7,2
7,2
T=87°4
m0=10

FIG.16

FIG. 17

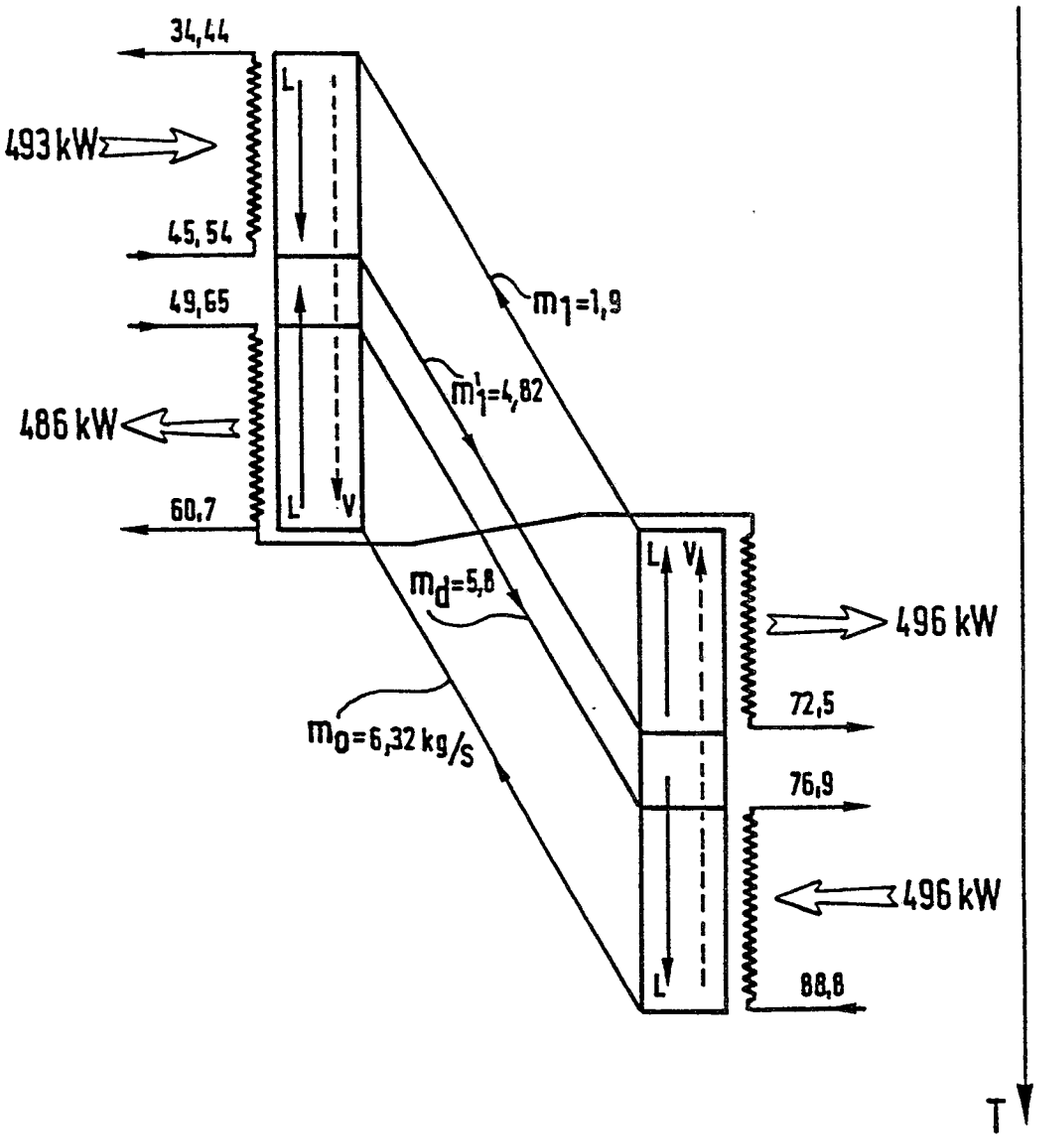

34,44
493 kW
45,54
49,65
486 kW
60,7
L
V
m_1=1,9
m_1^1=4,82
m_d=5,8
m_0=6,32 kg/s
496 kW
72,5
76,9
496 kW
88,6
T

FIG.18

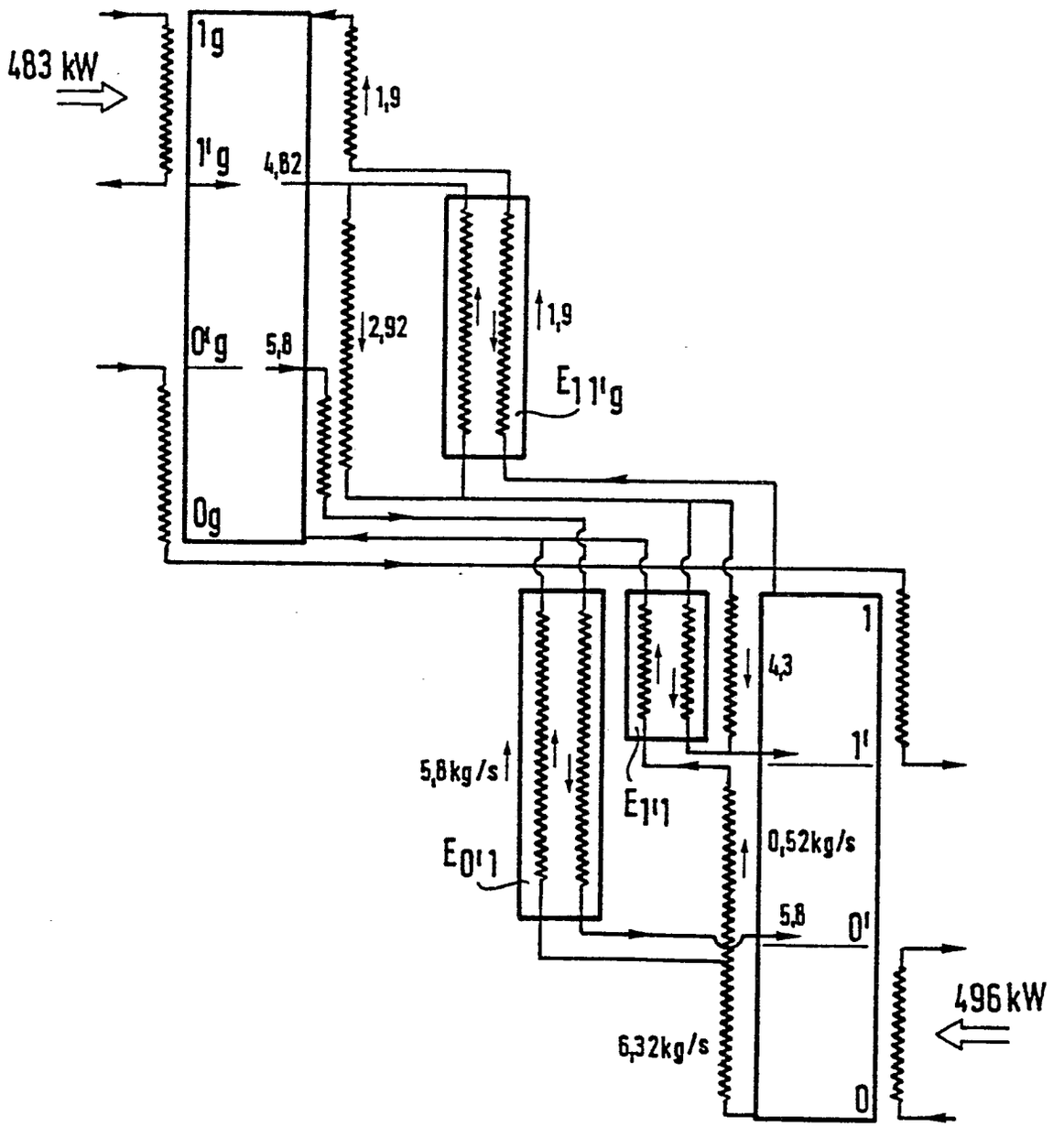

483 kW
1g
1'g
4,82
1,9
2,92
1,9
0'g
5,8
E1 1'g
0g
1
4,3
1'
5,8kg/s
E1'1
E0'1
0,52kg/s
5,8
0'
496kW
6,32kg/s
0

FIG. 19

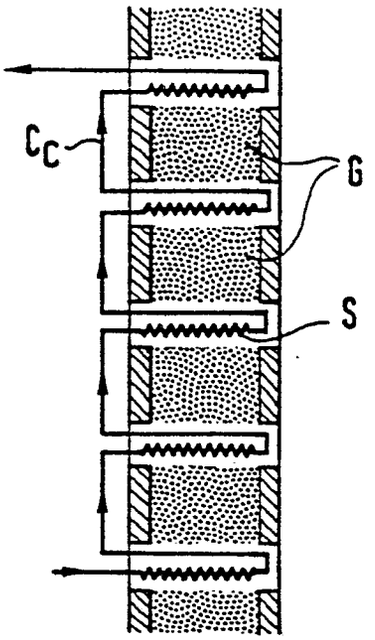
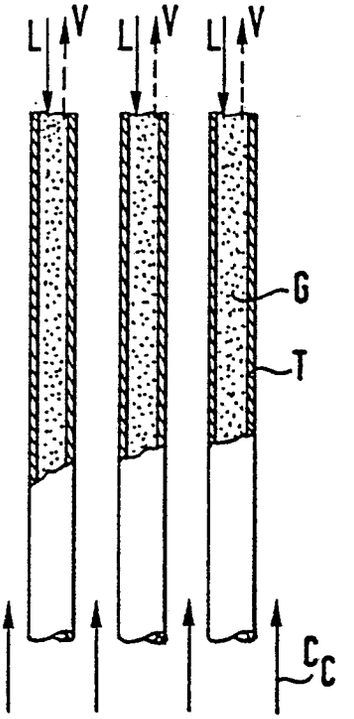


FIG. 20



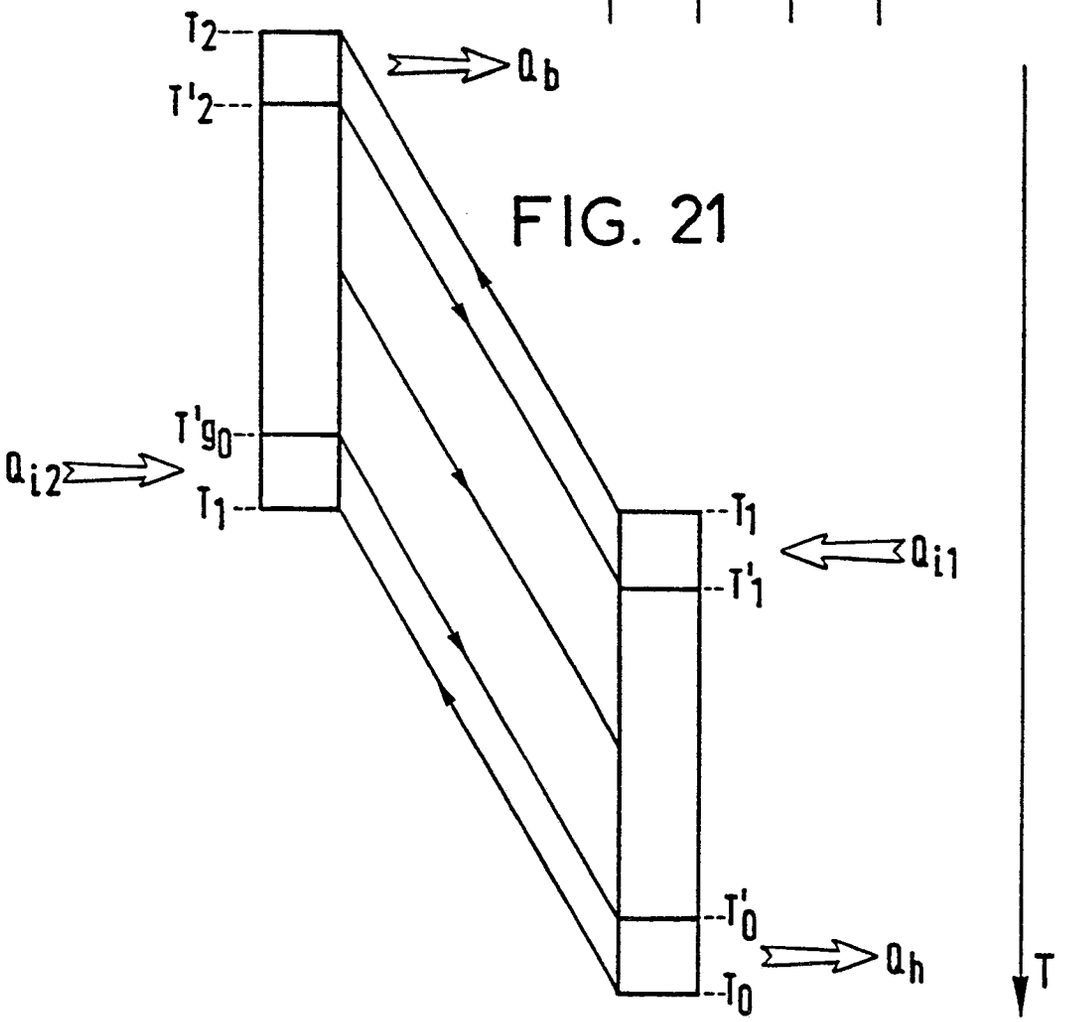


FIG. 21

FIG. 22A

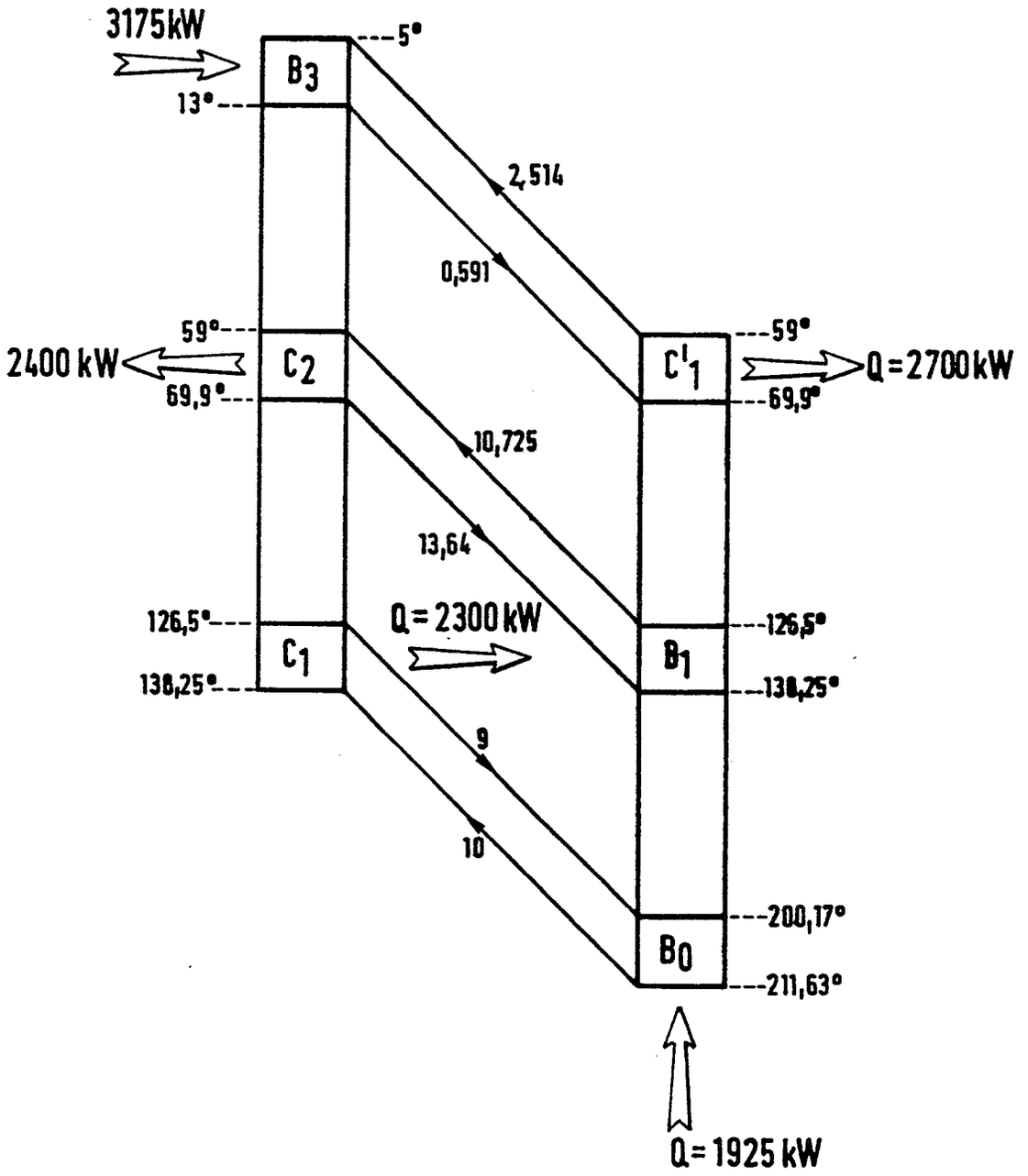

3175kW
B3
5°
13°
2,514
0,591
59°
2400 kW
C2
69,9°
C'1
59°
Q=2700kW
69,9°
10,725
13,64
126,5°
Q=2300 kW
C1
138,25°
B1
126,5°
138,25°
9
10
200,17°
B0
211,63°
Q=1925 kW

FIG. 22B

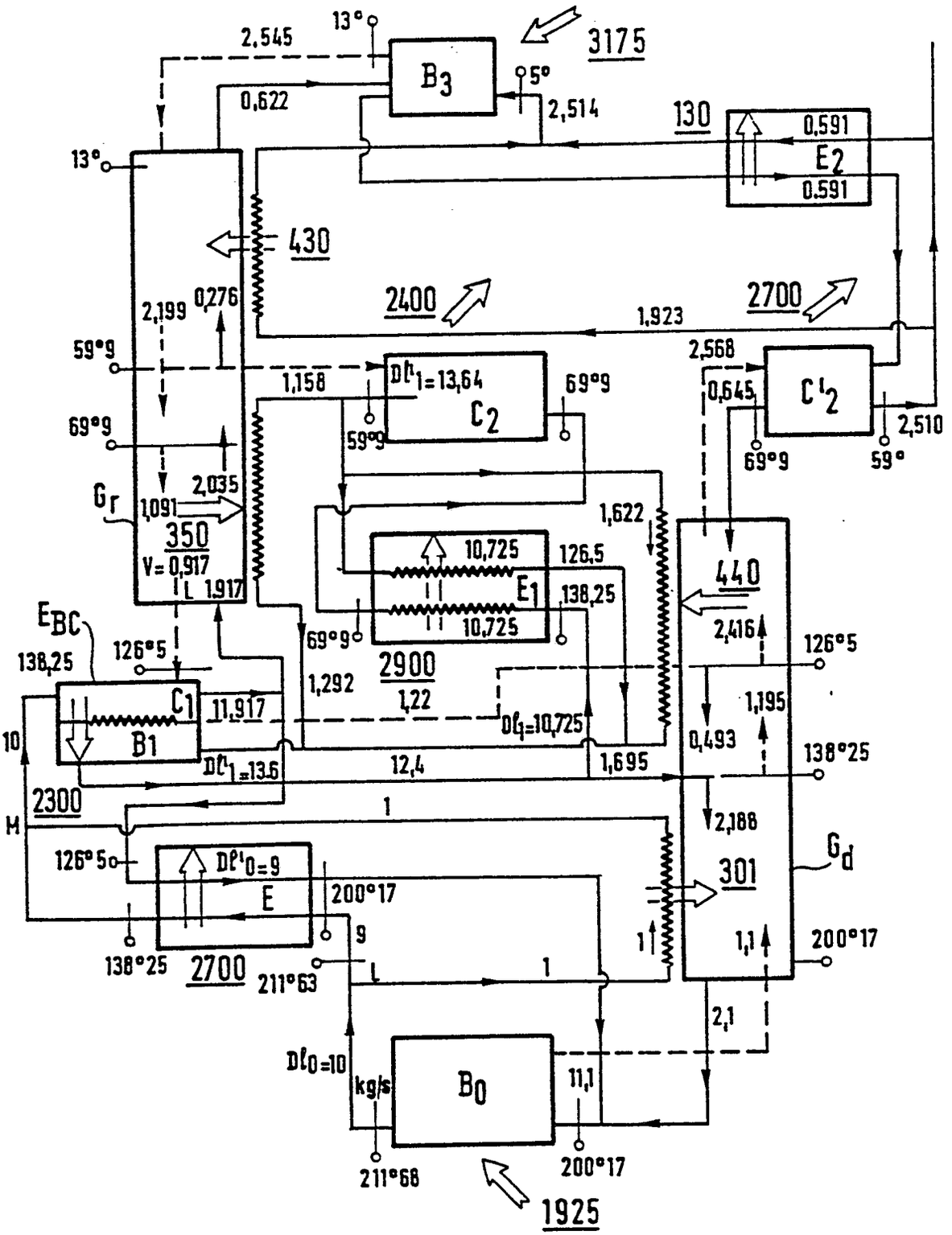

2,545
13°
B3
3175
5°
0,622
2,514
130
0,591
E2
0,591
13°
430
2400
2700
2,199
0,276
1,923
59°9
2,568
Dℓ1=13,64
C2
69°9
1,158
0,645
C'2
69°9
59°9
69°9
2,510
59°
Gr
1,091
2,035
350
V=0,917
L 1,917
1,622
10,725
126,5
E1
138,25
10,725
440
EBC
138,25
126°5
69°9
2900
1,22
1,292
2,416
126°5
C1
11,917
B1
Dℓ1=10,725
1,195
0,493
10
Dℓ'1=13,6
12,4
1,695
138°25
2300
1
2,188
M
126°5
Dℓ'0=9
E
200°17
301
Gd
9
1
1,1
200°17
138°25
2700
211°63
L
1
2,1
Dℓ0=10
kg/s
B0
11,1
211°68
200°17
1925

FIG. 23

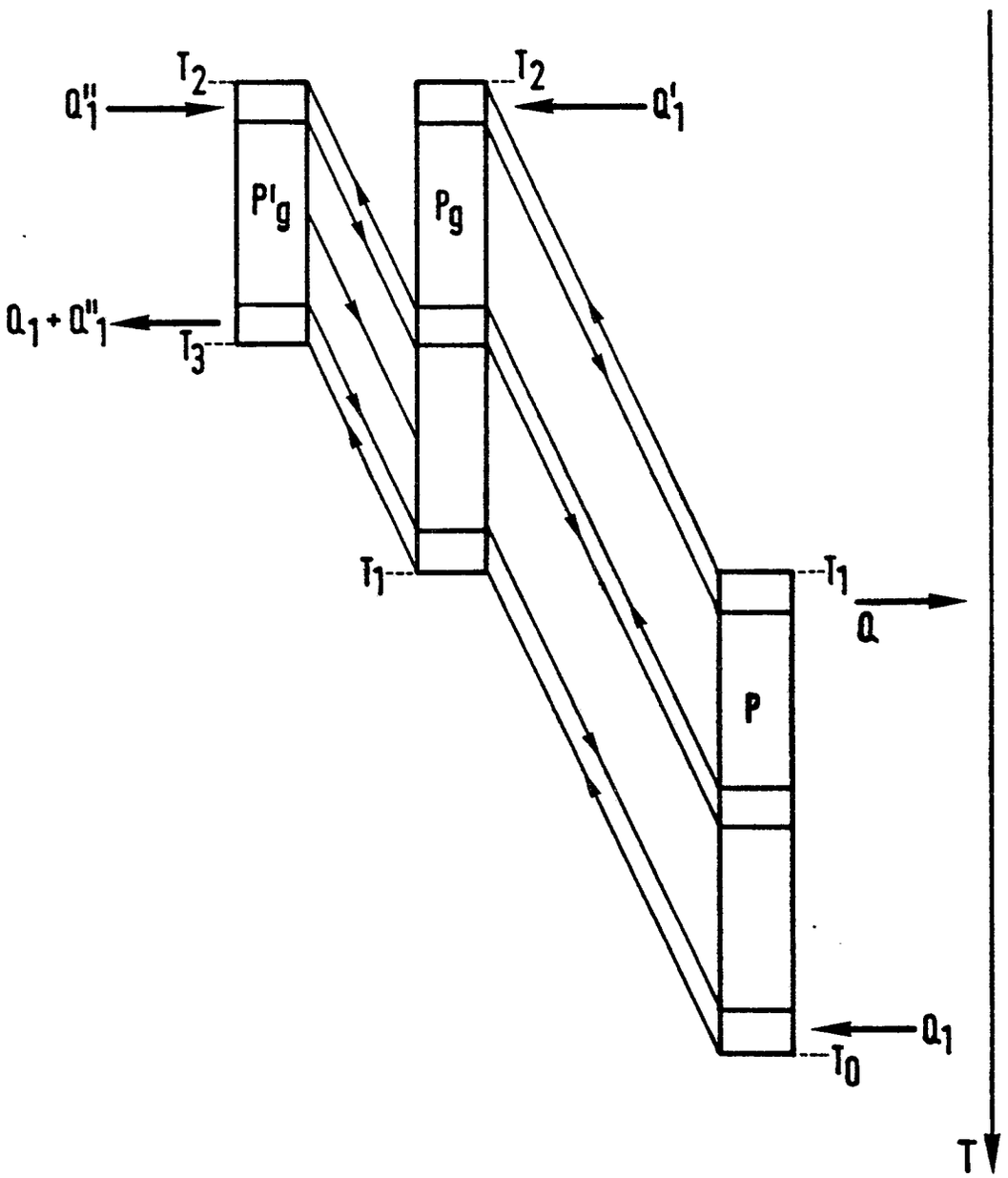


FIG. 24

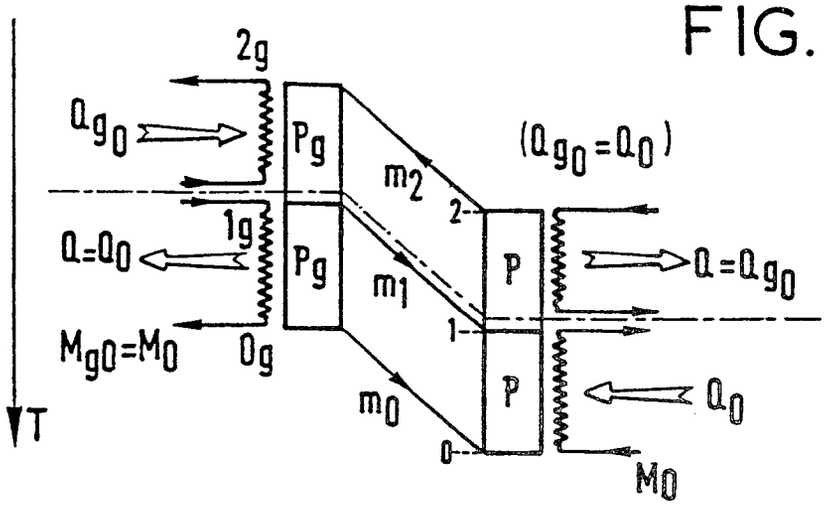


FIG. 25

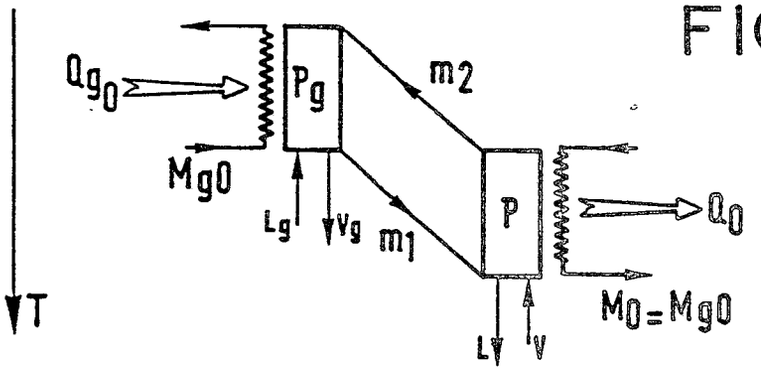


FIG. 26

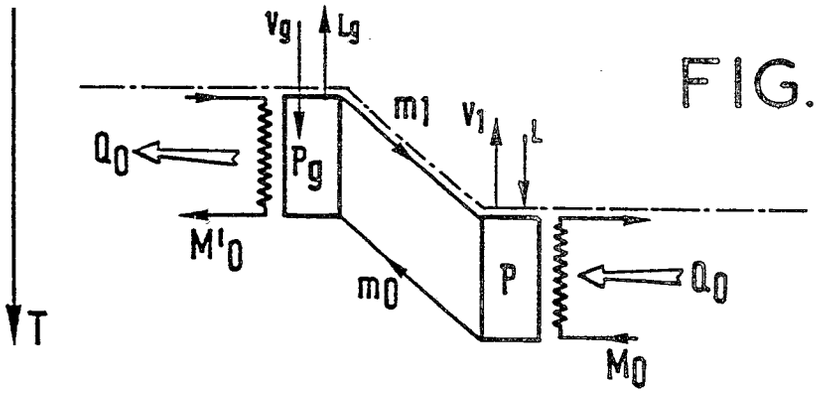


FIG. 27

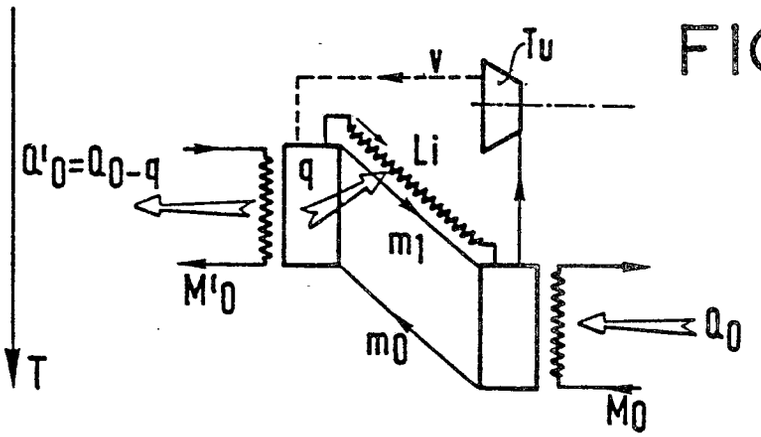


FIG. 28

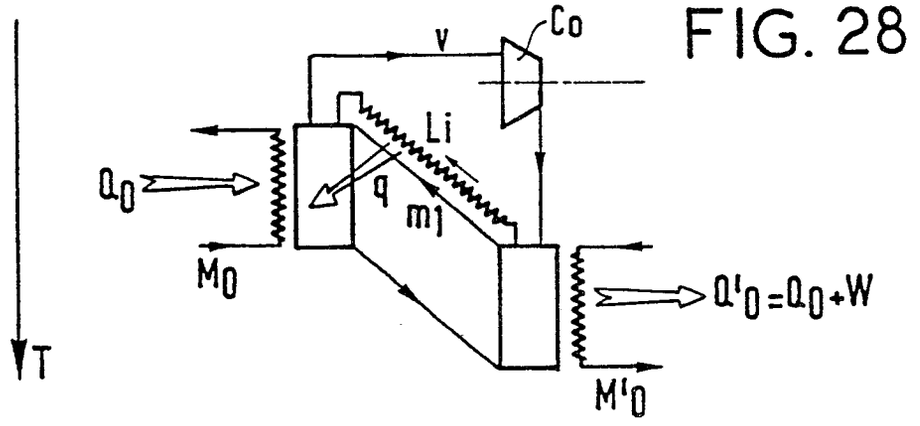


FIG. 29

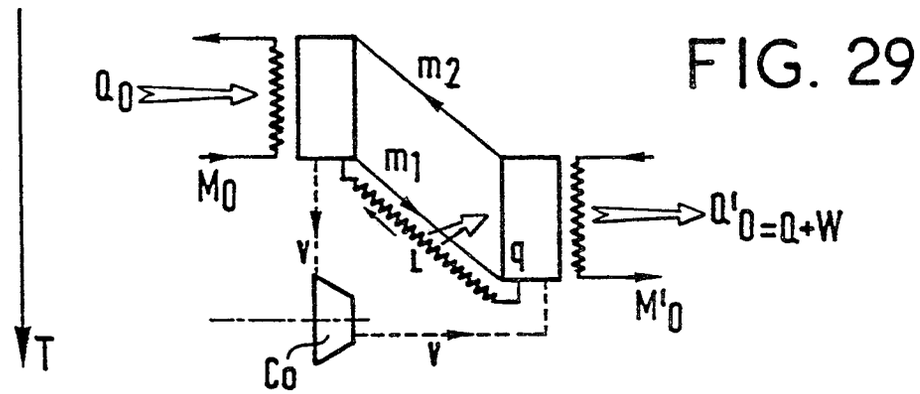


FIG. 30

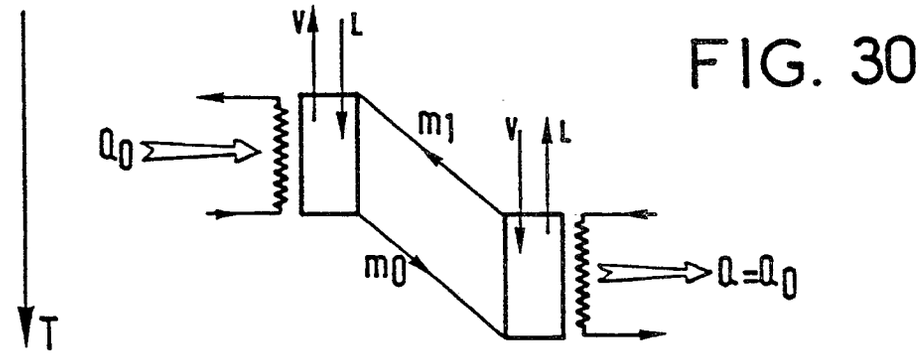


FIG. 31

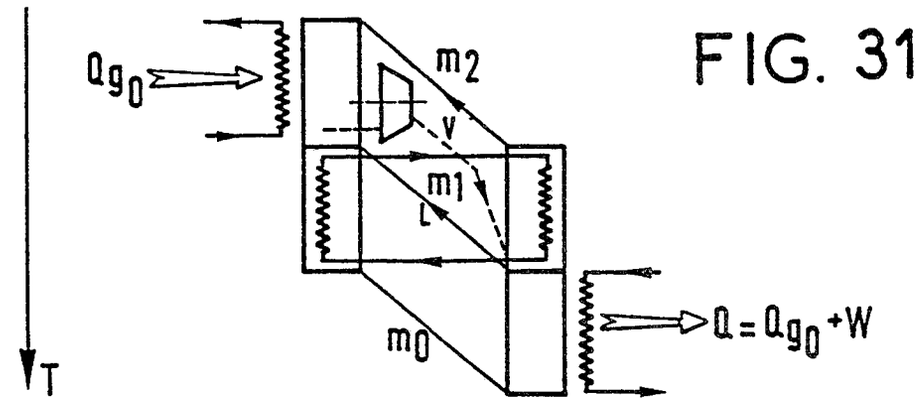


FIG. 32

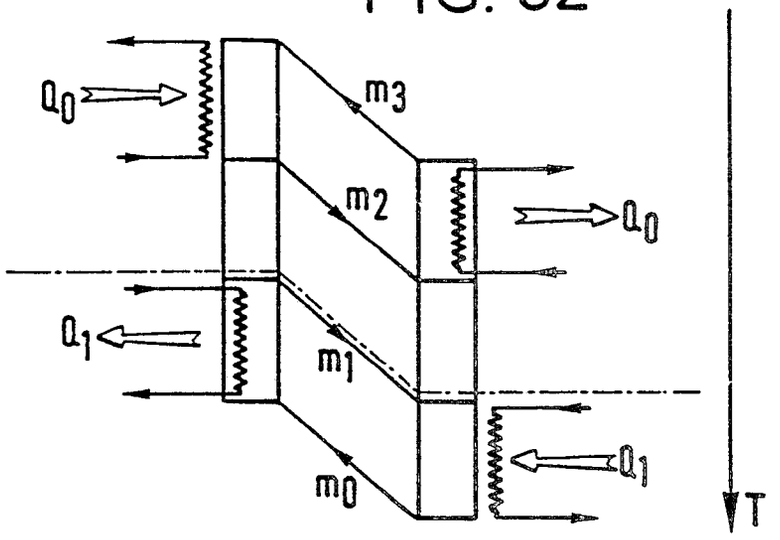


FIG. 33

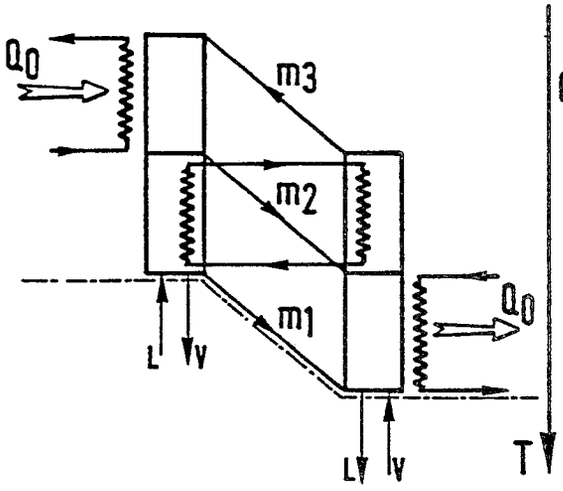


FIG. 34

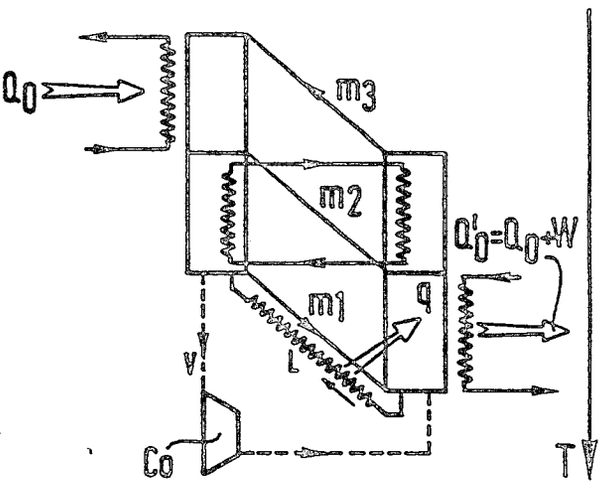
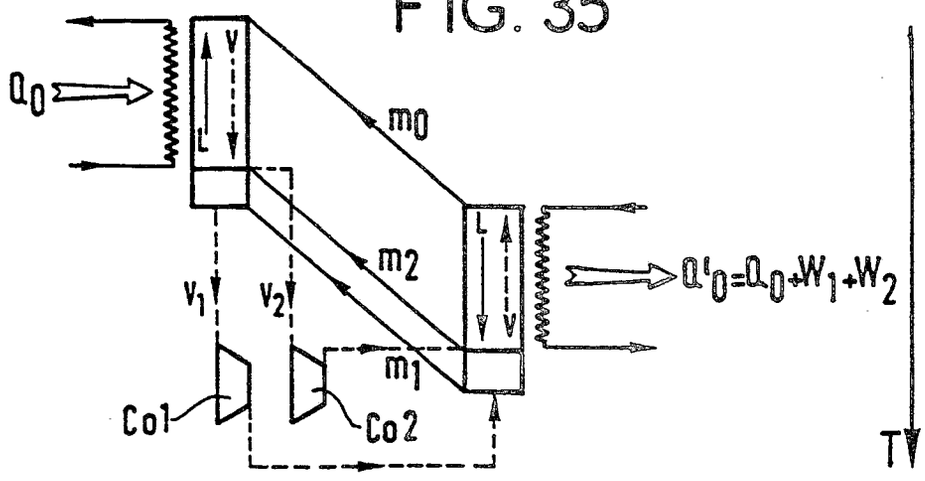


FIG. 35



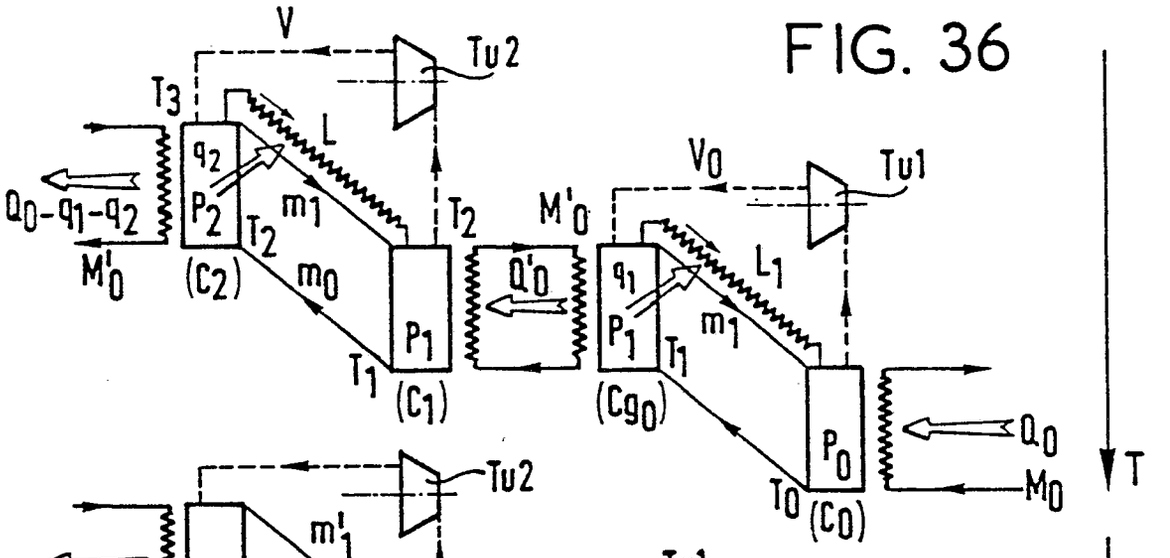


FIG. 36

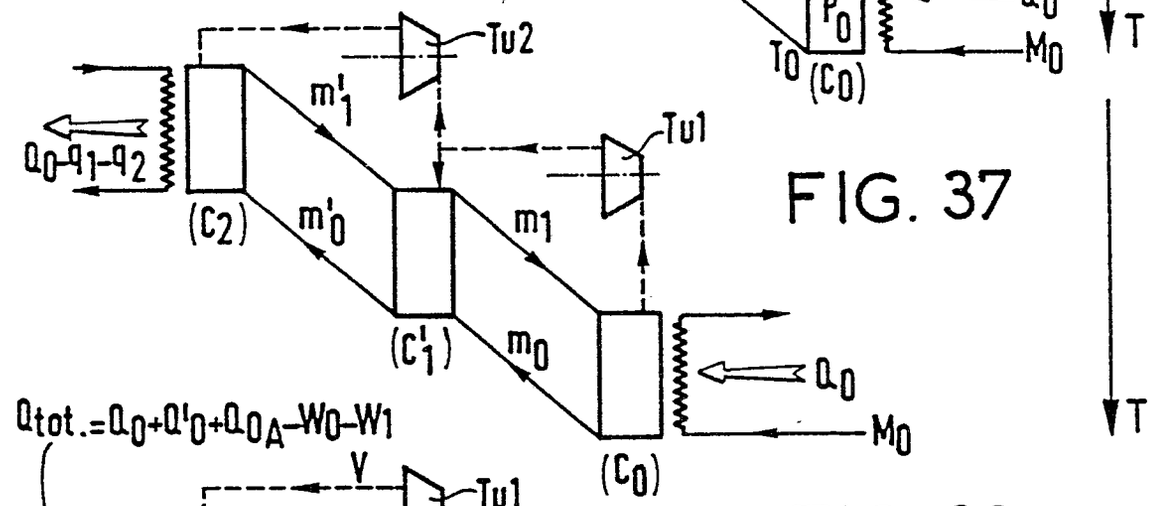


FIG. 37

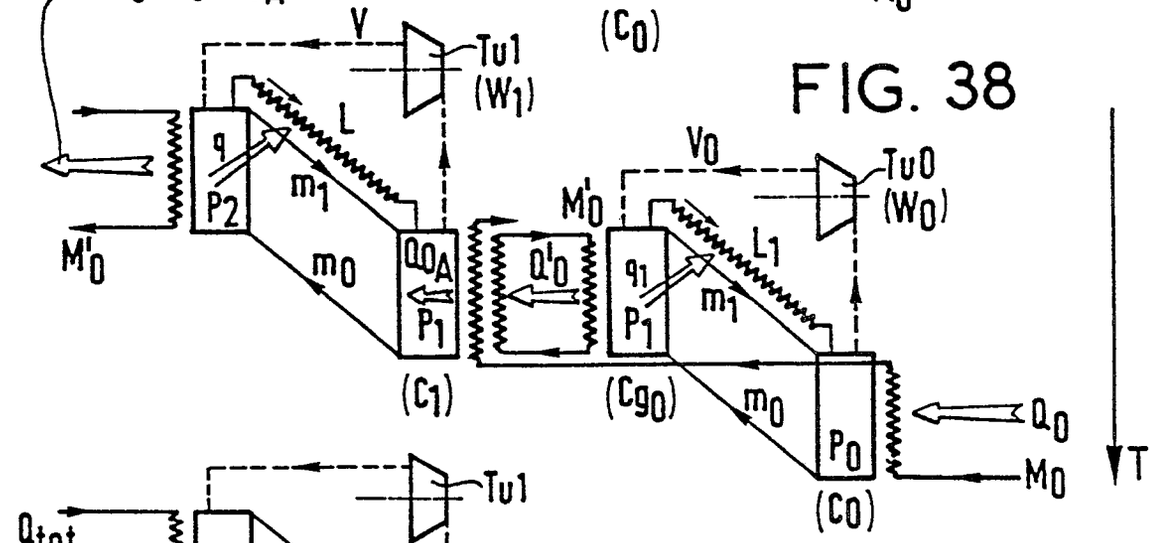


FIG. 38

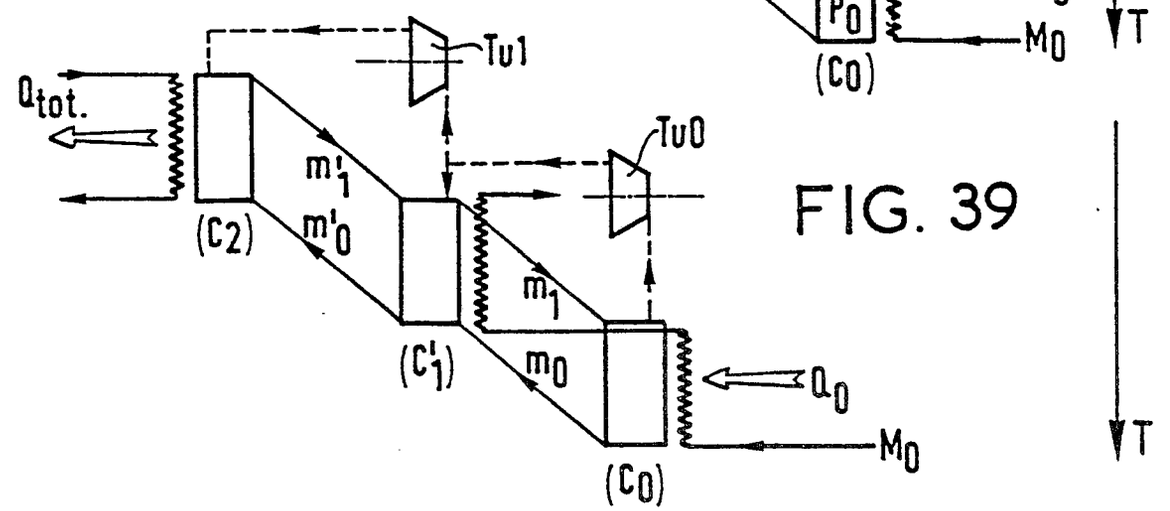


FIG. 39

FIG.40

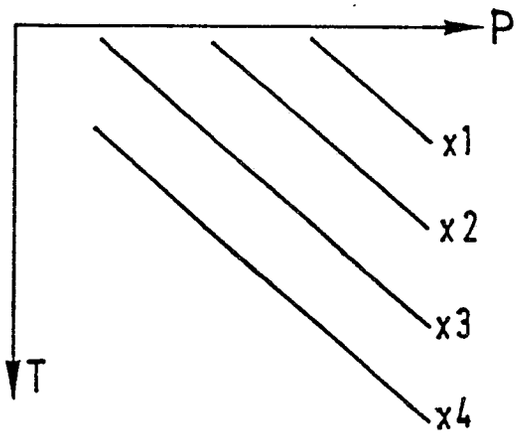


FIG. 41

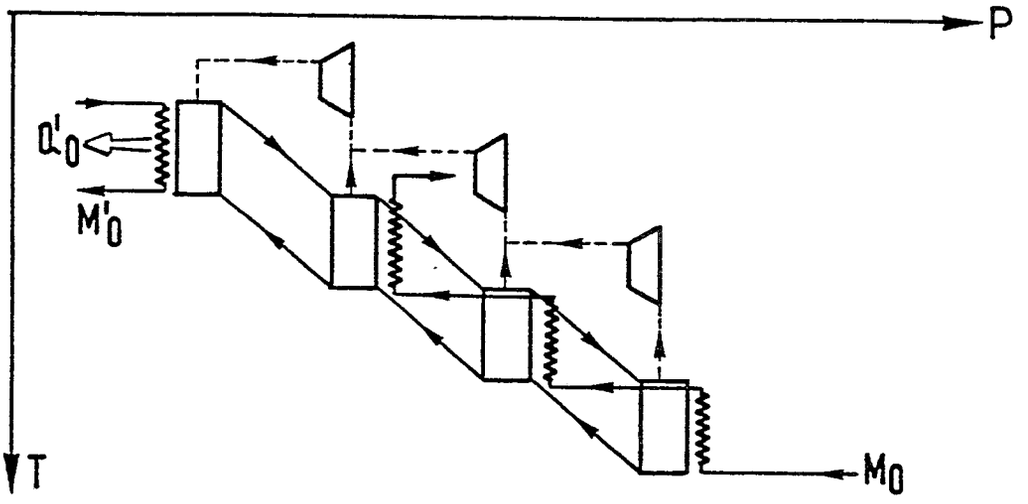


FIG. 42

