



(11) **EP 2 567 599 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
09.03.2016 Bulletin 2016/10

(51) Int Cl.:
H05H 1/24 (2006.01) **H05H 1/48** (2006.01)
H05H 1/34 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **11724269.3**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/FR2011/000277

(22) Date de dépôt: **04.05.2011**

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2011/138525 (10.11.2011 Gazette 2011/45)

(54) **PROCEDE ET DISPOSITIF POUR LA GENERATION D'UN JET DE PLASMA NON- ISOTHERMIQUE**

VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR ERZEUGUNG EINES NICHTISOTHERMISCHEN
PLASMASTRAHLS

METHOD AND DEVICE FOR GENERATING A NON-ISOTHERMAL PLASMA JET

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

(74) Mandataire: **Munier, Laurent**
Cabinet Laurent Munier SARL
20 rue de Stockholm
67000 Strasbourg (FR)

(30) Priorité: **05.05.2010 FR 1001928**

(56) Documents cités:
EP-A1- 1 748 687 WO-A1-03/084294

(43) Date de publication de la demande:
13.03.2013 Bulletin 2013/11

(73) Titulaire: **Abenz 81-40**
67118 Geispolsheim (FR)

- **LEE ET AL: "Optimization scheme of a rotating gliding arc reactor for partial oxidation of methane", PROCEEDINGS OF THE COMBUSTION INSTITUTE, ELSEVIER, NL, vol. 31, no. 2, 28 décembre 2006 (2006-12-28), pages 3343-3351, XP005818019, ISSN: 1540-7489, DOI: DOI:10.1016/J.PROCI.2006.07.230**
- **DESYATKOV ET AL.: "Experimental investigation and application of high-voltage low-current arc in gas flow", 20TH ICPIG, BARGA, ITALY, 1991, pages 978-979, XP8134672, cité dans la demande**

(72) Inventeurs:

- **KOULIK, Pavel**
F-67113 Blaesheim (FR)
- **SAYCHENKO, Anatoly**
F-67113 Blaesheim (FR)

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

EP 2 567 599 B1

Description

[0001] La présente invention consiste en un procédé de génération contrôlée de jet de plasma non-isothermique à pression voisine de la pression atmosphérique et un dispositif pour la mise en oeuvre de ce procédé.

[0002] La génération de jets de plasma a un rapport avec les technologies de transformation de la matière, notamment la plasmochimie, et plus particulièrement la destruction de produits, déchets.

[0003] Les générateurs de plasma les plus connus et les plus utilisés en pratique, notamment dans l'Industrie et en particulier pour la destruction des déchets domestiques, médicaux, industriels et autres, sont les générateurs de plasmas isothermiques à courant continu, alternatif, haute fréquence, micro-ondes.

[0004] Par « isothermique » on entend des plasmas dont les températures des différents composants, notamment des particules lourdes (molécules, atomes, radicaux, ions) T_a , et des électrons, T_e , sont pratiquement égales. Par définition, un plasma est isothermique quand, en tout point de son volume, se réalise la condition :

$$T_e = T_a \quad [1]$$

[0005] Les plasmas générés par les générateurs mentionnés ci-dessus sont, d'habitude, isothermiques. Cela signifie que les réactions chimiques qui s'y passent sont des relations d'équilibre thermodynamique local, décrits, par exemple, par la loi bien connue d'Arrhenius. La concentration des composants du plasma isothermique est décrite par l'équation, également bien connue, de Saha.

[0006] Si l'amplitude du champ électrique qui accélère les électrons du plasma et y provoque les réactions d'excitation et d'ionisation est assez élevée, il peut se faire que le plasma devient non-isothermique, c'à d. que :

$$T_e > T_a \quad [2]$$

[0007] Pour que la relation (2) ait lieu l'amplitude du champ électrique E doit obéir à une condition du type (cas d'un plasma faiblement ionisé) :

$$E > k \cdot T_a \cdot n_e \cdot Q / e \quad [3]$$

où

e est la charge de l'électron ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C) ;

k est la constante de Boltzmann ($k = 1,4 \cdot 10^{-19}$ J/K) ;

T_a est la température des composants lourds (molécules, radicaux, atomes, ions) du plasma (K) ;

Q est la section efficace des collisions élastiques entre les électrons et les composants neutres du plasma (m^2) ;

n_e est la concentration des électrons libres (m^{-3})

Si $T_a \sim 2000$ K, $n_e \sim 10^{19} m^{-3}$, $Q \sim 10^{-18} m^2$,

on a $E > 2 \cdot 10^4$ V/m..

[0008] L'utilisation pratique d'un plasma en état non-isothermique peut être technologiquement avantageuse. C'est le cas, par exemple de la destruction des déchets, mentionnée ci-dessus. En effet, les électrons qui, dans ce cas, ont une grande énergie cinétique, favorisent la formation d'états moléculaires excités et de radicaux, extrêmement efficaces pour la destruction des molécules organiques.

[0009] L'état de l'art, en particulier en ce qui concerne la destruction des déchets, a amené les utilisateurs des technologies de plasmas qu'ils jugent à raison plus efficaces que les méthodes traditionnelles d'incinération, à employer des générateurs de jets de plasmas isothermiques (c'à d. en état d'équilibre thermodynamique); à pression atmosphérique, tels que les générateurs d'arcs à courant continu, alternatif, radio fréquence ou micro-ondes.

[0010] La température de ces plasmas est de l'ordre de 6 000 - 12 000 K suivant les conditions de génération.

[0011] Il est clair que de tels plasmas sont efficaces pour détruire les molécules organiques qui constituent la plus grande partie des déchets mentionnés. Ils sont aussi efficaces pour détruire les molécules non-organiques.

[0012] Accompagnées d'un procédé de trempe du plasma (refroidissement rapide qui empêche la recombinaison de beaucoup d'états moléculaires nuisibles, notamment les dioxines et les furanes), ces technologies se sont avérées avantageuses par rapport aux technologies traditionnelles thermochimiques (voir par exemple, Zhukov M.F. Izv.S.O.AN USSR, Ser. Techn.Nauk, 1970, V2 (58) P 12 - 18 ; Burov I.S., Ermolaeva E.M., Mosse A.L., Minsk ITMO 1975, p.71 - 78 ; voir aussi www.europlasma.com).

[0013] Le niveau de températures mentionné (6 000 - 12 000 K) est cependant superflu. Il est inévitable si on utilise un plasma isothermique à pression atmosphérique car le niveau de température ($T = T_a = T_e$) détermine la concentration des électrons nécessaires à la conductivité électrique du plasma, cette dernière assurant le bilan énergétique de l'arc électrique et du jet de plasma en résultant. Ce niveau de température est cependant excessif pour la réalisation des réactions plasmochimiques de destruction des déchets en question. Ce niveau de températures amène à des dépenses énergétiques énormes qui rendent douteuses les raisons mêmes de l'utilisation des générateurs de plasma isothermique et font que l'exploitation des techniques traditionnelles d'incinération avec l'addition de filtres extrêmement chers, volumineux et peu efficaces reste aujourd'hui la solution malgré tout préférable en comparaison avec les jets de plasmas isothermiques.

[0014] La solution qui s'impose est donc d'utiliser un plasma non-isothermique, dont le niveau de température des composants lourds (T_a) serait de l'ordre de 2000 - 2500 K, ce qui est suffisant pour réaliser les réactions chimiques visées, par exemple celles nécessaires à la destruction des déchets sans formation de composants chimiques nocifs, tandis que la température des électrons serait de l'ordre de 6 000 - 12 000 K, ce qui assurerait un courant électrique suffisant pour soutenir le mécanisme de décharge électrique et le bilan énergétique du jet de plasma.

[0015] Des générateurs de plasma non isothermique ont été proposés, protégés par des brevets, et exploités au niveau industriel (voir, par exemple, Engelsht V. S., Saichenko A.N., Okopnik G.M., Musin N.U. XI Vsesoyuznaya Konf. Po generatoram nizkotemperaturnoy plazmi, Novosibirsk, 1989; P 255; Desiatkov G.A., Engelsht V.S., Saichenko A.N., Musin N.U., et al. Plasma Jets in the Development of New Materials Technology. Proc. Of the International Workshop 3-9 September, Frunze, USSR Ed. O.P.Solonenko, A.I.Fedorchenko. VSP, Utrecht, (NL), Tokyo (Japan), pp 499 - 509 ; Lee et al. "Optimization scheme of a rotating gliding arc reactor for partial oxidation of methane", Proceedings of the Combustion Institute 31(2007) 3343-3351 ; voir aussi www.glidarc.com).

[0016] Ils sont basés sur l'utilisation du principe de l'arc à haute tension glissant entre deux électrodes de géométrie divergente. Initié par une décharge à l'endroit où les électrodes sont le plus rapprochées l'une de l'autre, l'arc est propulsé le long de ces électrodes grâce à la force électromagnétique créée par le champ magnétique dû au courant qui parcourt l'électrode et le courant qui parcourt l'arc dans une direction pratiquement perpendiculaire à l'axe des électrodes. Le mouvement de l'arc peut être, en plus, sollicité par un courant longitudinal de gaz propulsant qui concourt à former le jet de plasma en aval des électrodes. Au fur et à mesure du glissement de l'arc, sa longueur et sa résistance électrique augmentent et l'intensité du courant diminue. Il arrive un moment où le courant devient trop faible pour soutenir le bilan énergétique de la décharge et l'arc disparaît. Une nouvelle décharge est alors de nouveau initiée à la base des électrodes et le processus se répète. On a donc un mouvement perpétuel de « va et vient » de l'arc le long des électrodes. Dans son mouvement, l'arc crée autour de lui un « nuage de plasma » dont les propriétés et notamment le temps de vie, dépendent de la nature du gaz dans lequel a lieu la décharge, de la présence d'un flux hydrodynamique de gaz, du niveau de l'amplitude de la tension entre les électrodes, et de la géométrie de divergence des électrodes. Ce nuage de plasma peut assurer l'existence d'une zone conductrice d'électricité en l'absence de courant électrique pendant sa durée de vie. Il est donc possible d'alimenter l'arc non seulement avec du courant continu mais aussi avec du courant en impulsions, si la durée de vie du nuage de plasma est supérieure à la pause qui sépare les impulsions de tension entre les électrodes. En particulier, il est possible d'alimenter l'arc glissant avec du courant alternatif, par exemple de fréquence 50Hz.

[0017] Des arcs glissants ont été créés par des générateurs à courant continu, à courant alternatif monophasé et triphasé. Dans ce dernier cas, des solutions à trois électrodes et à six électrodes ont été proposées et réalisées industriellement. L'utilisation de trois et six électrodes (voir Engelsht V. S., Gurovich V. Ts., Desyatkov G. A., Musin N. U., Saichenko A. N. Experimental investigation and application of the high-voltage low-current arc in gas flow. 20th IC-PIG.-Barga, 1991 -P.978-979) est proposée dans le but d'uniformiser le plus possible la zone de plasma générée, vu que ce plasma est hors d'équilibre thermodynamique et donc contient de grandes concentrations de molécules et de radicaux à l'état métastable. C'est l'énergie potentielle de ces particules (effets non thermiques), et non seulement leur énergie cinétique (effets thermiques), qui permettent de décomposer les particules des produits à détruire par le plasma.

[0018] Les procédés et générateurs mentionnés présentent les désavantages suivants qui les rendent difficilement applicables dans la pratique, ou bien en diminuent sensiblement l'efficacité :

1. Non-uniformité spatiale du jet de plasma généré.

2. Instabilité du plasma généré.
3. Impossibilité de contrôle du procédé et de ses paramètres.
4. Dimensions limitées (réduites) de la zone de plasma.
5. Zone de génération du plasma limitée aux électrodes (la présence des électrodes dans la zone de plasma obstrue le champ du traitement).

[0019] Le fait que l'arc glissant est par définition en mouvement constant peut être un désavantage car il conditionne la non-uniformité spatiale et l'instabilité du plasma généré.

[0020] Les auteurs cités ci-dessus (Desyatkov et al.) ont également proposé une configuration des électrodes qui fixe la position de l'arc dans l'espace dès que celui-ci a atteint les extrémités des électrodes. Les lignes de courant se courbent alors soumises, d'une part, à la force de traînée du flux de gaz propulsant et à la force électromagnétique et, d'autre part, à la résistance hydrodynamique de l'arc qui tend à conserver sa position dans la zone la plus ionisée de l'espace.

[0021] Cette solution est plus avantageuse que celle de l'arc glissant. Cependant les travaux expérimentaux montrent que l'arc, et donc le jet de plasma qu'il génère, reste instable. Cette instabilité est principalement due au caractère turbulent du flux de gaz propulsant.

[0022] En outre, vu la faible longueur du jet de plasma généré, il est difficile d'effectuer des travaux de traitement d'objets en évitant que le jet réfléchi par l'objet traité ne vienne altérer les pièces du générateur, notamment les électrodes. Il est donc très souhaitable que le jet de plasma soit sensiblement plus long. Cependant, il n'est possible d'allonger le jet de plasma selon les technologies existantes qu'en augmentant la puissance incidente, le rendement énergétique d'un tel générateur est très bas vu que les pertes de puissance augmentent pratiquement proportionnellement au carré de la dimension du jet, de forme proche de la sphère.

[0023] Dans le contexte de ce qui précède, un but de la présente invention est d'élaborer un procédé de génération de jet de plasma non-isothermique stable, à une pression voisine de la pression atmosphérique ou supérieure à la pression atmosphérique, qui puisse être utilisé de manière avantageuse pour la réalisation industrielle de réactions plasmochimiques notamment dans le domaine de la destruction et du recyclage des déchets, en particulier des déchets organiques.

[0024] Il est avantageux d'exploiter un procédé de génération d'un jet de plasma non-isothermique uniforme dans l'espace d'un réacteur plasmochimique.

[0025] Il est également avantageux d'exploiter un procédé de génération d'un jet de plasma non-isothermique stable dans le temps pendant toute la durée d'un traitement plasmochimique.

[0026] Il est aussi avantageux d'utiliser un jet de plasma de forme allongée et dont le rapport de la longueur au diamètre est substantiellement supérieur à l'unité.

[0027] Il est d'autant plus avantageux d'utiliser un jet de plasma non-isothermique laminarisé de manière à en augmenter la longueur tout en limitant les échanges énergétiques avec le milieu gazeux environnant.

[0028] Un grand avantage présente toute technologie capable d'assurer un traitement contrôlé variable en fonction de la composition du gaz d'apport, de la forme, de la nature, et de la composition du produit traité.

[0029] Des buts de l'invention sont réalisés grâce à la génération d'un jet de plasma non-isothermique, à pression voisine de la pression atmosphérique, selon un procédé de génération d'un jet axisymétrique de plasma non-isothermique à l'aide d'une décharge électrique à haute tension en courant continu ou alternatif monophasé ou triphasé dans un flux de gaz, décharge initiée par un plasma de claquage, propulsée par une force électromagnétique et par la force de traînée exercée par le flux de gaz et localisée aux extrémités d'électrodes, caractérisé en ce que le flux de gaz propulsant le plasma de la décharge est stabilisé en tous les points du jet de plasma résultant, la vitesse relative du gaz, V^* , en tout point du flux propulsant, obéissant à la relation du type:

$$r^* < D^* : \quad V^*(r^*) = 1.$$

$$D^* \leq r^* \leq 1 : \quad V^*(r^*) = 1 - \cos [\pi(r^* - 1)/2(D^* - 1)],$$

et qu'est satisfaite la condition de stabilisation hydrodynamique de l'arc:

$$V \leq Re^* \cdot \eta / \rho \cdot D,$$

où

$$D^*=D/D_0; r^*=2r/D_0;$$

D et D_0 sont respectivement le diamètre extérieur du jet, et le diamètre de la zone de laminarisation et que $D \leq D_0$;
 r est le rayon du point du jet où est déterminée la vitesse courante V ;

V_0 est la vitesse du flux laminarisé.

Re^* est le nombre critique de Reynolds du flux stabilisé ;

η et ρ sont respectivement la viscosité dynamique et la densité du gaz propulsant à la température du flux propulsant de la présente invention et un dispositif pour la mise en oeuvre d'un procédé de génération d'un jet de plasma non-isothermique tel que ci-dessus dans lequel le flux de gaz propulsant pénètre dans la zone de formation de l'arc par l'intermédiaire d'un distributeur de gaz comprenant un collecteur d'entrée, un dispositif de formation du profil des vitesses et une grille- tamis de la présente invention.

[0030] Ainsi, l'invention vise à résoudre les problèmes techniques exposés par un procédé de génération d'un jet axisymétrique de plasma non-isothermique conformément à la revendication 1.

[0031] L'invention a aussi pour objet de résoudre les problèmes techniques expliqués ci-dessus par un dispositif permettant la mise en oeuvre du procédé de génération d'un jet axisymétrique de plasma non-isothermique conformément à la revendication 5.

[0032] D'autres buts, caractéristiques et avantages de la présente invention ressortent des dessins, schémas et illustrations annexés à la présente invention, dans lesquels :

- La figure 1 illustre la configuration de l'arc à haute tension généré entre deux électrodes en régime de courant alternatif (50 Hz) convoyé par un flux de gaz dans deux cas :

fig.1a : le flux de gaz est turbulent

fig.1b : le flux de gaz est organisé de manière que les pulsations hydrodynamiques soient minimales, en particulier, le flux de gaz est laminarisé.

La fig.1c illustre également le fait que le jet de plasma non-thermique stabilisé comme le propose la présente invention, en particulier laminarisé, se propage sur une distance sensiblement supérieure à la longueur du flux non stabilisé.

- La fig.2 montre un schéma de réalisation du dispositif permettant de mettre en oeuvre la présente invention (« a ») et mentionne deux variantes de refroidissement des électrodes :

fig.2a : refroidissement à l'air;

fig.2b : refroidissement à l'eau.

- La fig.3 illustre un système de génération de jet de plasma non-thermique à trois électrodes alimentées par une source de courant triphasé.

- La fig.4 a illustre un système de génération de jet de plasma non-thermique à six électrodes alimentées par une source de courant triphasé, suivant deux configurations :

fig.4b : raccordement en étoile ;

fig.4c : raccordement en triangle;

- La fig.5a illustre un cas particulier d'application de la présente invention quand le générateur est alimenté par du courant alternatif triphasé et est pourvu de trois électrodes de base et d'une électrode annulaire de manière à étirer la partie du jet de plasma excitée par le courant électrique et de cette manière en contrôler la configuration.

[0033] La fig.5b illustre le cas où l'électrode annulaire est refroidie par gaz ou par eau.

- La fig.6 illustre le cas particulier de l'application d'un champ magnétique à chacune des six électrodes alimentant un générateur de jet non-thermique :

fig. 6a : section transversale du dispositif ;

fig. 6b : section longitudinale, champ magnétique pulsant dirigé de manière à concentrer la décharge électrique dans la zone axiale du jet de plasma.

fig. 6c : section longitudinale, champ magnétique pulsant dirigé de manière à localiser la décharge électrique dans la zone périphérique du jet de plasma.

fig 6d: section longitudinale, le champ magnétique est continu et

constant dans le temps. Dans ce cas, la décharge électrique effectue des oscillations.

- La fig.7 montre une section transversale d'un jet de plasma non-isothermique généré par six électrodes et amené en mouvement de rotation autour de son axe grâce à un système de déflecteurs et/ou à un Champ magnétique coaxial.
- La fig.8 illustre le cas particulier où le jet de plasma non-thermique est propulsé et stabilisé par un flux de gaz composé de zones concentriques de gaz chacune desquelles ayant un débit contrôlé par des vannes.
- La fig.9 est un graphique de la variation de la longueur de l'arc générant le jet de plasma non-isothermique, pour deux valeurs de la tension, en fonction de la vitesse V du gaz propulsant introduit pour stabiliser le jet de plasma non-isothermique selon la présente invention.
- Fig10. configuration des électrodes avec corps central fraisé.
- Fig11. configuration des électrodes avec plaquettes.

[0034] Le principe du procédé proposé réside en ce qui suit :

Il est proposé d'utiliser comme base le procédé de génération d'un jet axisymétrique de plasma non-isothermique à l'aide d'une décharge électrique à haute tension en courant continu ou alternatif monophasé ou triphasé dans un flux de gaz, décharge initiée par un plasma de claquage, propulsée par une force électromagnétique et par la force de traînée exercée par le flux de gaz et localisée aux extrémités d'électrodes.

[0035] Le plasma dans un tel jet est en état non-thermique tel que défini par les formules [1] - [3], ce qui donne des avantages de principe à la présente invention. Malheureusement, dans les applications existantes le jet de plasma généré est turbulent et l'avantage du plasma non-thermique reste pratiquement inutilisé, vu que les échanges énergétiques dans un plasma turbulens sont trop intenses et il devient impossible de les exploiter : l'énergie des électrons et celle des particules excitées et des radicaux libres éventuellement formés et en état métastable, sont « gaspillées » et perdues en chaleur.

[0036] L'invention présente permet, au contraire l'exploitation de ces avantages basée sur la limitation des pertes calorifiques et l'optimisation de l'utilisation des états excités des particules.

[0037] La présente invention consiste à stabiliser le jet de plasma en agissant sur le flux de gaz qui l'alimente et le propulse. La stabilisation est principalement de caractère hydrodynamique. Elle consiste à organiser en tous les points du flux de gaz qui enrobe et propulse le jet de plasma des conditions où les échanges convectifs sont éliminés et ne subsiste pratiquement que la dissipation moléculaire, notamment la conduction thermique et la diffusion. L'expérience des auteurs de la présente invention a montré que, pour cela :

- la vitesse relative du gaz, V^* , en tout point du flux propulsant, doit obéir à la relation empirique du type:

$$r^* < D^* : \quad V^*(r^*) = 1. \quad [1];$$

$$D^* \leq r^* \leq 1: \quad V^*(r^*) = 1 - \cos [\pi(r^* - 1)/2(D^* - 1)] \quad [2];$$

- que doit être satisfaite la condition de stabilisation hydrodynamique:

$$V \leq Re^* \cdot \eta / \rho \cdot D, \quad [3]$$

où

$$D^* = D/D_0; r^* = 2r/D_0;$$

D et D_0 sont respectivement le diamètre extérieur du jet

et le diamètre de la zone de stabilisation ($D \leq D_0$);

r est le rayon du point du jet où est déterminée la vitesse courante V;

V_0 est la vitesse du flux laminarisé ;

Re^* est le nombre critique de Reynolds du flux stabilisé ;

η et ρ sont respectivement la viscosité dynamique et la densité du gaz propulsant à la température et à la pression du flux propulsant.

[0038] Par nombre critique de Reynolds, Re^* , on entend la valeur du nombre de Reynolds à laquelle le flux passe de manière spontanée de l'état laminaire à l'état turbulent. Pour un flux dans un tube axisymétrique cette valeur est bien connue et se trouve au niveau de 2000. L'expérience montre que ce passage spontané est déterminé par les différences de vitesse entre les couches voisines du fluide ou plus précisément par le gradient de cette vitesse. Il est imaginable, et l'expérience des auteurs de la présente invention le confirme, d'avoir un flux de base de grande vitesse et de dimension caractéristique restreinte pour lequel le caractère des échanges reste moléculaire même si le nombre de Reynolds est fortement supérieur à 2000. Des flux de ce genre sont appelés pseudo-laminaires par les auteurs de la présente invention. Des flux pseudo-laminaires ont été observés par les auteurs de la présente invention pour des nombres de Reynolds (calculés formellement) allant jusqu'à 100 000. Il suffit pour cela que le flux soit enrobé dans une « gaine » de fluide où la vitesse passe de manière monotone et sous forme de fonction lisse de la valeur de la vitesse au coeur du flux de base à la vitesse du flux environnant, en particulier la vitesse nulle d'un environnement immobile. En plus, l'expérience a montré que pour qu'un flux soit pseudo-laminaire, il est nécessaire que le gradient de la vitesse du flux dans la zone intermédiaire soit égal à zéro aux frontières du flux intermédiaire avec le flux de base et le flux environnant.

[0039] La valeur de Re^* ne peut être déterminée qu'empiriquement. Les travaux effectués par les auteurs de la présente invention ont montré que, pratiquement, $Re^* \sim 1,5 \cdot 10^4$. Ce résultat peut être utilisé pour toutes les configurations de jet de plasma mentionnées et pour tous les dispositifs de mise en oeuvre cités dans la présente invention. Pour d'autres configurations, afin de rester dans le domaine d'application de la présente invention, il y a lieu, avant de fixer le régime et les paramètres d'exploitation du jet de plasma, d'effectuer les mesures hydrodynamiques bien connues et classiques sur le dispositif adopté de manière à déterminer empiriquement Re^* et, par la suite, choisir la valeur de V selon la formule [3].

[0040] Quand un flux pseudo-laminaire baigne un cordon de plasma ou un arc, l'expérience des auteurs de la présente invention a montré que la condition de pseudo-laminarité autour du cordon de plasma se satisfait pratiquement automatiquement : le cordon de plasma ne se perturbe pas. Les échanges avec le flux restent laminaires.

[0041] Pour que le cordon de plasma (même si l'axe de celui-ci a une direction perpendiculaire par rapport à la direction du flux qui le contourne) ne soit pas perturbé par le flux propulsant, il suffit donc que ce flux soit pseudo-laminaire.

[0042] Les relations [1] - [3] sont un exemple pratique de réalisation de la condition de pseudo-laminarité revendiquée dans la présente invention. La présente invention permet donc, en particulier, de minimiser les échanges énergétiques entre le jet de plasma et le milieu environnant. Des exemples ont montré que le jet de plasma pseudo-laminarisé, et donc stabilisé, peut être très long. On a donc la possibilité d'en contrôler et d'en optimiser la forme et le bilan énergétique de manière à optimiser les échanges thermiques et les échanges de masse avec la charge de matière traitée.

[0043] Une telle optimisation est possible, par exemple, en appliquant un champ magnétique perpendiculaire à la direction du courant électrique qui parcourt le cordon de plasma générant le jet de plasma. Les forces électromagnétiques engendrent une rotation de l'arc électrique ce qui stimule les échanges énergétiques au sein du jet de plasma non-thermique.

[0044] Une rotation du jet de plasma non-thermique est également obtenue en introduisant le flux de gaz propulsant sous un angle tel qu'il forme un tourbillon de plasma grâce auquel les échanges énergétiques sont stimulés dans le jet de plasma.

[0045] Des champs magnétiques peuvent également être appliqués à chacune des électrodes ce qui permet de modifier la forme du cordon de plasma, le rapprochant de l'axe du jet ou l'en éloignant suivant que la direction d'application du champ magnétique (parcouru par un courant alternatif) par rapport à la direction du courant électrique qui alimente la décharge. Un champ magnétique constant peut permettre d'élargir et de raccourcir la forme du jet.

[0046] Une fois le jet de plasma stabilisé (pseudo-laminarisé), il devient maintenant avantageux de combiner la vitesse du jet de plasma, déterminant l'intensité des échanges énergétiques et la formation du plasma non-thermique autour du (des) cordons de plasma, les effets de stabilisation et de pseudo-laminarisation (organisation du profil des vitesses du gaz propulsant), de rotation électromagnétique, de rotation hydrodynamique, de compression ou d'extension de la

forme du (des) cordons de plasma ce qui donne la possibilité d'introduire des mélanges gazeux (contenant des composant

qui se décomposent en particules actives au contact du plasma non-thermique) dans le jet de plasma non-thermique et d'optimiser leur état d'excitation et leur composition, notamment la concentration des radicaux libres qui favorisent la destruction des molécules organiques et la reconstruction de composants utiles tels que le syngaz, par exemple.

[0047] Le principe du dispositif de la présente invention est illustré sur la figure 1.

[0048] La fig. 1a montre le caractère chaotique du cordon de plasma 2 issu des électrodes 1 d'un dispositif standard alimenté par un flux turbulent de gaz, tel qu'utilisé dans la pratique et que photographié de multiples fois par les utilisateurs. On voit que les électrodes 1 émettent un cordon de plasma 2 de forme indéterminée, instable dans l'espace et le temps. La zone de plasma 3 autour du cordon est également instable dans le temps et l'espace. Cette configuration limite fortement les applications de ce type de plasma qui ne peut pas être appelé un jet de plasma.

[0049] La fig. 1b montre le résultat de principe de l'utilisation d'un dispositif de distribution du débit de gaz propulsant. Le cordon de plasma 2 est stabilisé. Le jet de plasma 4 est enrobé dans le jet de gaz 5 issu du distributeur 6. Il est de configuration stable et uniforme.

[0050] La fig. 1c donne une comparaison de principe des deux cas mentionnés plus haut : le cordon de plasma 2, la zone de plasma 3 sont sensiblement étirés et de longueur plus grande que dans le cas du dispositif standard. Apparaît un jet de plasma 4 stabilisé par le jet de gaz 5.

[0051] De manière générale, le dispositif pour la mise en oeuvre du procédé de génération d'un jet de plasma non-thermique stabilisé tel que défini dans la présente invention est illustré par la fig. 2. Une décharge à haute tension sous la forme d'un cordon de plasma de section pratiquement constante, 2, est amorcée entre deux électrodes 1, parallèles ou divergeant sous un angle déterminé par rapport à l'axe de symétrie du générateur, reliés par l'intermédiaire de tiges métalliques 7 et d'un cône métallique 8 à une source de courant alternatif 9. Le cône métallique est relié au système d'alimentation électrique par l'intermédiaire d'un condensateur 10 et peut être déplacé le long de son axe de manière à faire varier la distance le séparant des tiges métalliques.

[0052] Le gaz d'alimentation, propulsant et stabilisant le jet de plasma non-thermique 4 est introduit par l'intermédiaire d'un conduit 11 pourvu d'un collecteur 12, d'une grille-tamis 13 et d'un dispositif de distribution de débit (de vitesse) 14.

[0053] Le collecteur est alimenté en gaz par l'intermédiaire du conduit d'entrée 15. Des composants gazeux, liquides ou sous forme de gouttelettes pulvérisées, peuvent être ajoutés au flux de gaz par l'intermédiaire du conduit 16.

[0054] Le distributeur de débit 14 peut servir à prédéterminer et contrôler la distribution radiale du débit du flux de gaz. Il peut être constitué, notamment, d'un ensemble de tubes de faible diamètre disposés en nid d'abeilles, comme le montre la fig. 2. Le profil des longueurs de ces tubes détermine le profil des résistances hydrodynamiques en fonction du rayon du distributeur. Cela permet de créer un profil 17 de vitesses ($V(r)$) qui prédétermine la stabilité du flux de gaz et donc du flux résultant de plasma. En particulier, on peut de cette manière former un flux de gaz dont la partie centrale 18 de diamètre D a une vitesse constante et la partie périphérique, limitée au diamètre D_0 (19), a un profil radial prédéterminé (17). L'expérience montre qu'un tel flux a toutes les apparences et les caractéristiques d'un flux laminaire. Quand ce flux baigne le cordon de plasma, il le stabilise. Les échanges au sein de ce jet (zones 4) sont des échanges moléculaires dont l'intensité est substantiellement inférieure à celle des échanges turbulents. En particulier, les échanges thermiques et les échanges de masse sont déterminés par la conductivité thermique et la diffusion dans le milieu et non par les échanges thermiques et les échanges de masse turbulents. Ils sont donc de beaucoup plus faible intensité et de plus grande étendue. Cela permet d'obtenir un jet de plasma de grandes dimensions, surtout de grande longueur, c'est à dire de transporter le plasma à grande distance sans en perdre les caractéristiques déterminantes (l'enthalpie) ce qu'illustre la fig. 1c.

[0055] En d'autres termes, le dispositif selon la présente invention est notamment caractérisé en ce que le dispositif de formation du profil de vitesses du flux de gaz propulsant (14) est un système axisymétrique de tubes coaxiaux disposés en nid d'abeilles et traversés longitudinalement par les supports conducteurs des électrodes, l'axe des tubes étant parallèle à l'axe du flux et la longueur courante des tubes inversement proportionnelle à la vitesse locale du flux de gaz.

[0056] Les tiges 7 sont construites de manière à représenter une résistance hydrodynamique minimale pour le flux de gaz de manière à ne perturber que localement le caractère du flux de gaz.

[0057] Les électrodes 1 qui supportent les dégagements de chaleur dus au passage des charges électriques de la zone métallique au gaz (émission auto-électronique) et sont inévitablement soumis à une érosion peuvent être refroidis par un flux de gaz (l'électrode 1 peut dans ce cas être traversé par un canal de gaz 20 qui les parcourt comme le montre la fig. 2 b) ou par un courant d'eau (l'électrode 1, dans ce cas, est parcourue par un courant d'eau 21 comme le montre la fig. 2 c).

[0058] Le cône métallique (8) qui permet l'amorçage de la décharge entre les électrodes peut être remplacé par un

corps fraisé longitudinalement (35) tel qu'illustré sur la figure 10, ce qui permet de diminuer sa résistance hydrodynamique. Cette dernière peut également être réduite si le cône métallique 8 est remplacé par des plaques métalliques (36) radiales fixées sur les électrodes et conçues de manière que la distance entre les plaques soit minimale dans la partie des électrodes la plus en amont du flux axial de gaz, comme le montre la figure 11

[0059] Le dispositif fonctionne de la manière suivante : au moment de l'amorçage de la décharge, un arc court s'allume entre le cône 8 et les tiges 7.

[0060] Poussé par les forces électromagnétiques et la traînée du flux de gaz qui baigne le cordon de plasma 2, celui-ci se déplace vers la droite, atteint les électrodes 1 et se fixe à leurs extrémités en position 22. Sa forme stable est déterminée par l'équilibre entre les forces mentionnées et la force de résistance thermique qui contraint l'arc à occuper le canal ionisé créé plutôt que de se déplacer dans une zone voisine non ionisée. Autour du cordon de plasma se crée une zone de plasma non-thermique 4 stable et uniforme : les conditions (2) et (3) ont lieu. Les valeurs et les gradients de températures (T_a , T_e) et de concentrations des composants du plasma dans cette zone sont déterminés par les échanges moléculaires (conduction thermique, diffusion, conductivité électrique) et conditionnent l'étendue de la zone de plasma non-thermique du jet.

[0061] La fig.3 illustre un schéma de mise en oeuvre de la présente invention selon lequel le cordon de plasma 2 est généré par trois électrodes 1 par l'intermédiaire d'un cône métallique 8 connecté à un générateur de courant électrique triphasé avec des éléments de ballast sous forme d'inductances 23 ce qui permet d'avoir un rendement énergétique particulièrement élevé. Le système est stabilisé par un flux de gaz issu d'un distributeur de gaz 6 permettant d'enrober les électrodes et les cordons de plasma par un flux de gaz dont le profil radial du débit est prédéterminé de manière à stabiliser la décharge et laminariser le jet de plasma.

[0062] Une solution encore plus avantageuse est proposée sur la fig.4. Dans ce cas, le cordon de plasma 2 est généré par six électrodes 1 par l'intermédiaire du cône métallique 8, connecté à un générateur de courant électrique triphasé 9. L'ensemble des électrodes est baigné par un flux laminarisé de gaz stabilisant 5 issu d'un distributeur 14. Suivant que les connexions des électrodes sont effectuées en triangle (comme le montre la connexion 9' de la fig. 4b) ou en étoile (comme le montre la connexion 9" de la fig. 4c), on a une configuration des cordons de plasma centralisée 24' ou périphérique 24". Suivant l'application du jet de plasma non-thermique, l'une ou l'autre des solutions est préférable.

[0063] La fig.5 illustre une autre réalisation possible de la présente invention. Dans ce cas le jet de plasma non-thermique stabilisé 4 est formé par des cordons de plasma 2 connectant les trois électrodes alimentées par une source de courant alternatif triphasé 9 à une électrode annulaire 5. Comme le montre la fig.5c l'électrode annulaire 25, disposée à se surchauffer vu son contact avec le jet de plasma, peut être refroidie, par exemple à l'aide d'un courant d'eau amené et évacué par les conduits 26. Des protubérances 27 sont éventuellement pratiquées de manière à localiser et fixer la base des cordons de plasma.

[0064] De cette manière, le dispositif revendiqué dans la présente invention est notamment caractérisé en ce qu'il est pourvu d'une électrode (25) à la masse, circulaire, coaxiale au jet laminarisé et l'entourant à l'intérieur de la zone de laminarisation de manière à localiser la décharge dans la zone de laminarisation du jet généré.

[0065] La stabilisation (voir fig. 5 b) se réalise par un flux de gaz 5 issu d'un distributeur 6 dans lequel le dispositif de nid d'abeille 14 de la fig. 2 est remplacé par un système d'expansion brusque 27 qui permet de créer un profil de vitesses 17 du flux adapté empiriquement au schéma de la figure 5. On voit que le gaz de propulsion 28 introduit dans le distributeur 6 crée un tourbillon 29 dans le flux de gaz profilé 30 dirigé vers la grille-tamis 13, formant ainsi le profil de vitesses voulu $V(r)$ 17.

[0066] La fig.6a illustre le cas d'addition de solénoïdes 31 créant des champs magnétiques perpendiculaires aux cordons de plasma 2 issus de chacun des électrodes 1. Le flux de gaz propulsant issu du distributeur 6 et stabilisant le jet de plasma 4 est organisé de manière à enrober toute la configuration des cordons de plasma, que ceux-ci soient concentrés par le champ magnétique, généré par courant alternatif, vers l'axe du générateur (voir fig. 6 b), ou bien poussés vers l'extérieur (voir fig. 6 c) suivant que les oscillations du champ et du courant sont en phase ou en contre-phase, ou bien encore, forcés par un champ magnétique constant dans le temps, oscillant entre les deux situations des fig.6b et fig.6 c comme le montre la fig.6d.

[0067] La fig.7a montre la section transversale d'un autre dispositif de mise en oeuvre de la présente invention, selon lequel le flux de gaz propulsant 28, et par conséquent les cordons de plasma 2 issus des six électrodes 1, après avoir quitté le cône métallique 8, sont tourbillonnés par des déflecteurs hydrodynamiques 32 ou par un champ magnétique généré par un solénoïde 31, champ magnétique dont les oscillations sont synchronisées avec le courant alternatif d'alimentation des décharges.

[0068] La fig.7b montre l'angle δ entre l'axe des déflecteurs et la direction du flux de gaz propulsant.

[0069] La fig.7c montre l'angle δ' entre l'axe du déflecteur et la tangente au cercle de fixation radiale des déflecteurs. On a $\delta \leq 90^\circ$ et $\delta' \leq 90^\circ$.

[0070] Le dispositif selon la présente invention peut également être caractérisé en ce qu'il comporte des solénoïdes (31) parcourus par un courant électrique continu ou alternatif, notamment synchronisé avec le courant alimentant la décharge, les solénoïdes étant disposés de manière à créer un champ magnétique dirigé sous un angle β compris entre

0° et 90° par rapport à la direction du courant de la décharge et sous un angle γ entre 0° et 90° par rapport à la direction du flux laminarisé.

[0071] La fig. 8 montre la section longitudinale d'un dispositif de distribution du gaz propulsant 28 selon lequel la position du cordon de plasma 2 et la configuration de la zone de plasma 3 issus des électrodes 1 après avoir quitté le cône métallique 8 sont contrôlées par un dispositif 33 pourvu de vannes 34 assurant une distribution du gaz propulsant 28, par portions, le long du cône métallique, à travers les électrodes (notamment pour les refroidir) et à la périphérie du générateur.

[0072] La fig.9 illustre la dépendance de la longueur du jet de plasma, L(m) de la vitesse du gaz de propulsion, V (m/s) pour différentes valeurs de la tension appliquée aux électrodes.

[0073] La présente invention peut être avantageusement utilisée dans les industries chimique, plasmochimique, et pharmaceutique, notamment pour la fabrication de poudres et en particulier de nano-poudres.

[0074] Les générateurs de jet de plasma non-thermique peuvent être avantageusement utilisés dans différentes industries pour la stérilisation instantanée de surfaces contaminées.

[0075] L'utilisation de la présente invention est exceptionnellement effective et avantageuse, notamment économiquement pour la destruction des déchets ménagers, médicaux industriels et surtout pour l'incinération par plasma des déchets organiques. Dans ce cas, elle permet notamment d'éliminer des gaz résiduels nocifs tels que les dioxines et les furanes et de recycler les déchets organiques en les transformant en produits combustibles tels que le syngaz.

Exemples :

[0076]

1. Générateur de jet de plasma non-thermique à base d'air à pression atmosphérique applicable pour la destruction de déchets médicaux.

Puissance : 100 kW

Pression : 1 bar

Tension aux électrodes : 10 kV

Fréquence : 50 Hz

Courant électrique maximum : 10 A

Quantité d'électrodes : 6

Dispositif de stabilisation: distributeur à nid d'abeilles.

Nombre de Reynolds du flux d'air baignant l'arc de plasma : varie entre 300 et 14.000. Le jet de plasma conserve ses propriétés quasi-laminaires grâce aux mesures prises pour le stabiliser.

2. Générateur de jet de plasma non-thermique à base de gaz de composition complexe à pression sub-atmosphérique applicable pour la destruction de déchets médicaux.

Puissance : 100 kW

Pression : 1,7 bar.

Tension aux électrodes : 20 kV

Fréquence : 50 Hz

Courant électrique maximum : 5 A

Quantité d'électrodes : 6

Dispositif de stabilisation: distributeur à expansion brusque.

Nombre de Reynolds du flux d'air baignant l'arc de plasma : varie entre 300 et 14.000. Le jet de plasma conserve ses propriétés quasi-laminaires grâce aux mesures prises pour le stabiliser.

[0077] Dans le cas des deux exemples cités plus haut, l'application d'un champ magnétique perpendiculaire de 0,11T au courant électrique selon la figure 6 a permis, suivant la configuration de ce champ, de réduire la longueur du jet de 3m à 0,8 m et d'en augmenter le diamètre de 4,5 cm à 12cm.

[0078] La figure 9 illustre la variation de la longueur de l'arc générant le jet de plasma non-isothermique en fonction de la vitesse du flux d'air propulsant le jet de plasma non-thermique, pour les deux valeurs de la tension illustrées dans les deux exemples ci-dessus, selon la présente invention.

Conclusions :

[0079]

1. La mise en oeuvre de la présente invention permet d'obtenir des longueurs d'arc générant le jet de plasma non-isothermique de l'ordre de plusieurs mètres, ce qui est de beaucoup supérieur à l'étendue des arcs glissants connus et des jets de plasma non-isothermiques non stabilisés.

2. Le jet de plasma conserve ses propriétés de quasi-laminarité, même quand le nombre de Reynolds est supérieur à 2000.

3. Le procédé revendiqué et le dispositif de sa mise en oeuvre tel qu'utilisé dans les présents exemples permet d'atteindre des buts de la présente invention. Il permet de transporter le plasma à une distance supérieure à celle atteinte dans l'exemple précédent, et donc de le projeter sur la cible que peut représenter une charge de déchets médicaux, sans être perturbé par ou agir sur les pièces du dispositif de génération du jet de plasma, notamment les électrodes.

4. L'utilisation de très hautes tensions est cependant peu recommandée vu la probabilité et le danger de décharges non programmées en dehors du dispositif. On observe également, à très haute tension des décharges intérieures que viennent « shunter » l'arc et perturber le jet de plasma.

5. L'utilisation d'un champ magnétique perpendiculaire au courant électrique de la décharge, permet de contrôler la configuration du jet et d'en optimiser les dimensions et le bilan énergétique, ce qui confirme l'utilité de l'invention pour des applications pratiques nécessitant l'adaptation du jet de plasma à la charge de matière à traiter, par exemple, dans le cas de la destruction ou du recyclage des déchets, notamment médicaux.

Revendications

1. Procédé de génération d'un jet axisymétrique de plasma non-isothermique à l'aide d'une décharge électrique à haute tension dans un flux de gaz comprenant :

- disposer au moins deux électrodes (1) pour la formation d'un arc électrique (4) ;
- disposer une source de courant continu ou alternatif (9) ;
- relier chacune des électrodes (1) à la source (9) de courant ;
- disposer un distributeur de gaz (6) pour introduire un flux de gaz dans la zone de formation de l'arc (4) ;

caractérisé en ce que le procédé comprend en outre

- relier chacune des électrodes (1) à la source (9) de courant par l'intermédiaire d'une tige métallique (7) ;
- disposer à proximité des tiges métallique (7) un cône métallique (8), qui est relié à la source de courant (9) par l'intermédiaire d'un condensateur (10) et qui peut être déplacé le long de son axe de manière à faire varier la distance le séparant des tiges métalliques (7), ledit cône métallique (8) permettant l'amorçage de la décharge entre les tiges métalliques (7), de façon à ce que l'arc électrique soit propulsé par la force électromagnétique et par la force de traînée du flux de gaz le long des tiges métalliques (7) et les électrodes (1) ; et
- • disposer dans le distributeur de gaz (6) un dispositif de formation du profil des vitesses (14) du gaz tel que le flux de gaz propulsant l'arc électrique soit stabilisé en tous les points du plasma résultant, où la condition de stabilisation est obtenue en imposant un profil des vitesses obéissant à la relation du type:

$$r^* < D^* : \quad V^*(r^*) = 1.$$

$$D^* \leq r^* \leq 1: \quad V^*(r^*) = 1 - \cos [\pi(r^* - 1)/2(D^* - 1)],$$

et qu'est satisfaite la condition de stabilisation hydrodynamique de l'arc:

$$V \leq Re^* \cdot \eta / \rho \cdot D,$$

où

$$D^*=D/D_0; r^*=2r/D_0;$$

5

D et D_0 sont respectivement le diamètre extérieur du jet, et le diamètre de la zone de laminarisation et que $D \leq D_0$;

r est le rayon du point du jet où est déterminée la vitesse courante V ;

V_0 est la vitesse du flux laminarisé.

10

Re^* est le nombre critique de Reynolds du flux stabilisé ;

η et ρ sont respectivement la viscosité dynamique et la densité du gaz propulsant à la température du flux propulsant.

15

2. Procédé selon la revendication 1 **caractérisé en ce que** l'arc est soumis à l'action de champs magnétiques perpendiculaires au courant électrique.

20

3. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le courant électrique de l'arc ou des arcs est dirigé parallèlement ou sous des angles $\delta \leq 90^\circ$ par rapport à l'axe du flux de gaz propulsant et $\delta' \leq 90^\circ$ par rapport à la tangente au cercle sur lequel sont positionnés déflecteurs de types hydrodynamique (3) provoquant un mouvement tourbillonnant des cordons de plasma (1).

25

4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le flux de gaz propulsant contient des composants moléculaires, par exemple de la vapeur d'eau, qui se décomposent en particules excitées métastables et en radicaux au contact du plasma non thermique.

30

5. Dispositif permettant la mise en oeuvre du procédé de génération d'un jet axisymétrique de plasma non-isothermique selon les revendications de 1 à 4, comprenant au moins vitesse relative du gaz obéissant à la relation obéissant à la relation du type:

- deux électrodes (1) alimentées en courant continu ou alternatif monophasé ou triphasé pour générer un arc électrique (4) entre elles;
- une source de courant continu ou alternatif (9) ;
- un distributeur de gaz (6) pour introduire un flux de gaz dans la zone de formation de l'arc (4) ;

35

caractérisé en ce que

chacune des électrodes (1) est relié par l'intermédiaire d'une tige métallique (7) à la source de courant (9) ;

et en ce que

le dispositif comprend en outre un cône métallique (8), qui est relié à la source de courant (9) par l'intermédiaire d'un condensateur (10) et qui peut être déplacé le long de son axe de manière à faire varier la distance le séparant des tiges métalliques (7), ledit cône métallique (8) permettant l'amorçage de la décharge entre les tiges métalliques (7) ;

40

et en ce que

le distributeur de gaz (6) comprend

45

- un collecteur d'entrée (12),
- un dispositif de formation du profil des vitesses(14) du gaz ; et

une grille- tamis (13).

50

6. Dispositif selon la revendication 5, **caractérisé en ce que** le dispositif de formation du profil de vitesses (14) du flux de gaz propulsant (28) est un système axisymétrique de tubes coaxiaux disposés en nid d'abeilles et traversés longitudinalement par les supports conducteurs des électrodes, l'axe des tubes étant parallèle à l'axe du flux et la longueur courante des tubes inversement proportionnelle à la vitesse locale du flux de gaz telle que déterminée dans la revendication 1.

55

7. Dispositif selon l'une des revendications 5 ou 6, **caractérisé en ce que** le dispositif de formation du profil de vitesses (14) du flux de gaz propulsant (28) comprend un collecteur(12), un anneau d'expansion brutale(27) et une grille-

tamis (13).

8. Dispositif selon l'une des revendications 6 ou 7, **caractérisé en ce qu'il** comporte des solénoïdes (31) parcourus par un courant électrique continu ou alternatif, notamment synchronisé avec le courant alimentant la décharge, les solénoïdes étant disposés de manière à créer un champ magnétique dirigé sous un angle β compris entre 0° et 90° par rapport à la direction du courant de la décharge et sous un angle γ entre 0° et 90° par rapport à la direction du flux laminarisé.
9. Dispositif selon l'une des revendications 5 à 8, **caractérisé en ce que** le collecteur du dispositif de laminarisation est pourvu de conduits d'alimentation(15,16) en composants sous forme de liquides, de jets pulvérisés ou de gaz.
10. Dispositif selon l'une des revendications 5 à 9, **caractérisé en ce qu'il** est pourvu d'une électrode à la masse (25), circulaire, coaxiale au jet laminarisé et l'entourant à l'intérieur de la zone de laminarisation de manière à localiser la décharge dans la zone de laminarisation du jet généré.
11. Dispositif selon l'une des revendications 5 à 10, **caractérisé en ce que** deux électrodes (1), parallèles ou divergeant sous un angle déterminé par rapport à l'axe de symétrie d'un générateur, sont reliés par l'intermédiaire de tiges métalliques (7) et d'un cône métallique (8) à une source de courant alternatif (9) de manière à amorcer entre lesdites électrodes (1) une décharge à haute tension sous la forme d'un cordon de plasma de section pratiquement constante.
12. Dispositif selon la revendication précédente, **caractérisé en ce que** le cône métallique (8) permettant l'amorçage de la décharge entre les électrodes (1) est remplacé par un corps fraisé longitudinalement (35) ce qui permet de diminuer sa résistance hydrodynamique.
13. Dispositif selon la revendication 11, **caractérisé en ce que** le cône métallique 8 est remplacé par des plaques métalliques radiales (36) fixées sur les électrodes (1) et conçues de manière que la distance entre les plaques soit minimale dans la partie des électrodes la plus en amont du flux axial de gaz.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Erzeugung eines achsensymmetrischen, nicht-isothermen Plasmastrahls mit Hilfe einer elektrischen Entladung unter Hochspannung in einem Gasstrom, mit:
 - Anordnen wenigstens zweier Elektroden (1) für die Bildung eines Lichtbogens (4);
 - Anordnen einer Gleich-oder Wechselstromquelle (9);
 - Verbinden jeder der Elektroden (1) mit der Stromquelle (9);
 - Anordnen eines Gasverteilers (6), um einen Gasstrom in die Zone der Bildung des Bogens (4) einzuleiten;
 - Verbinden jeder der Elektroden (1) mit der Stromquelle (9) mittels eines Metallstiftes (7),
 - Anordnen eines Metallkegels (8) in der Nähe der Metallstifte (7), der mit der Stromquelle (9) mittels eines Kondensators (10) verbunden ist und der entlang seiner Achse verschoben werden kann, derart, dass dieser den Abstand variieren kann, der die Metallstifte (7) trennt, wobei der Metallkegel (8) die Zündung der Entladung zwischen den Metallstiften (7) erlaubt, derart, dass der Lichtbogen durch die elektromagnetische Kraft und durch die Widerstandskraft des Gasstroms entlang der Metallstifte (7) und der Elektroden (1) angetrieben wird;
 - und
 - Anordnen einer Anordnung zur Bildung des Geschwindigkeitsprofils (14) des Gases in dem Gasverteiler (6), genauso, dass der den Lichtbogen antreibende Gasstrom an all den Punkten des resultierenden Plasmas stabilisiert wird, an denen die Bedingung der Stabilisierung unter Auferlegung eines Geschwindigkeitsprofils erhalten wird, das der Beziehung des Typs entspricht:

$$r^* < D^*: \quad V^*(r^*) = 1.$$

$$D^* \leq r^* \leq 1: \quad V^*(r^*) = 1 - \cos(r^* - 1) / 2(D^* - 1),$$

und dass die Bedingung einer hydrodynamischen Stabilisierung des Bogens erfüllt wird:

$$V \leq Re^* \cdot \eta / \rho \cdot D,$$

in welcher $D^* = D/D_0$; $r^* = 2r/D_0$;

D und D_0 sind jeweils der Außendurchmesser des Strahls und der Durchmesser der Laminarisierungszone, und das $D \leq D_0$ ist;

r ist der Radius des Punkts des Strahls, an welchem die aktuelle Geschwindigkeit V bestimmt wird;

V_0 ist die Geschwindigkeit des laminarisierten Stroms.

Re^* ist die kritische Reynoldszahl des stabilisierten Stroms;

η und ρ sind jeweils die dynamische Viskosität und die Dichte des Antriebsgases und die Temperatur des Betriebsstroms.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Bogen der Wirkung eines magnetischen Feldes senkrecht zum elektrischen Strom ausgesetzt wird.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der elektrische Strom des Bogens oder der Bögen gelenkt wird parallel oder unter Winkeln $\delta \leq 90^\circ$ in Bezug zu der Achse des antreibenden Gasstroms und $\delta' \leq 90^\circ$ in Bezug zu der Kreistangente, auf welcher hydrodynamische Deflektoren (3) positioniert sind, welche eine turbulente Bewegung des Plasmastrahls (1) provozieren.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der antreibende Gasstrom molekulare Bestandteile enthält, zum Beispiel Wasserdampf, die sich bei Kontakt mit dem nicht-thermischen Plasma in angeregte metastabile Teilchen und in Radikale zersetzen.

5. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens zur Erzeugung eines axensymmetrischen nicht-isothermischen Plasmastrahls nach den Ansprüchen 1 bis 4, mit wenigstens zwei Elektroden (1), die mit Gleich- oder Wechselstrom in Monophase oder Triphase versorgt werden, um einen Lichtbogen (10) zwischen diesen zu erzeugen;

- einer Gleich- oder Wechselstromquelle (9);

- einem Gasverteiler (6), um einen Gasstrom in der Zone zur Bildung des Bogens (4) einzuführen;

dadurch gekennzeichnet, dass

jede der Elektroden (1) mittels eines Metallstifts (7) mit der Stromquelle (9) verbunden ist;

und dadurch, dass

die Vorrichtung ferner einen Metallkegel (8) umfasst, der mit der Stromquelle (9) mittels eines Kondensators (10) verbunden ist und der entlang seiner Achse verschoben werden kann, derart, dass dieser den Abstand variieren kann, der die Metallstifte (7) trennt, wobei der Metallkegel (8) die Zündung der Entladung zwischen den Metallstiften (7) ermöglicht;

und dadurch, dass

der Gasverteiler (6) umfasst

- einen Eingangskollektor (12),

- eine Einrichtung zur Bildung des Geschwindigkeitsprofils (14) des Gases; und ein Gittersieb (13).

6. Vorrichtung nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einrichtung zur Bildung des Geschwindigkeitsprofils (14) des antreibenden Gasstroms (28) ein achsensymmetrisches System aus coaxialen Rohren ist, die wabenartig angeordnet sind und in Längsrichtung durch die Leiterträger der Elektroden hindurch verlaufen, wobei die Achsen der Rohre parallel zur Achse des Stroms verlaufen und die laufende Länge der Rohre umgekehrt proportional zu der lokalen Geschwindigkeit des Gasstroms ist, wie dieser im Anspruch 1 bestimmt ist.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einrichtung zur Bildung des

Geschwindigkeitsprofils (14) des antreibenden Gasstroms (28) einen Kollektor (12), einen stark expandierenden Ring (27) und ein Gittersieb (13) umfasst.

8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** diese Solenoide (31) umfasst, die von einem elektrischen Gleich- oder Wechselstrom durchlaufen werden, insbesondere synchronisiert mit dem Versorgungsstrom der Entladung, wobei die Solenoide derart angeordnet sind, dass diese ein Magnetfeld erzeugen, das unter einem Winkel β zwischen 0° und 90° in Bezug zu der Richtung des Stroms der Entladung und unter einem Winkel γ zwischen 0° und 90° in Bezug zu der Richtung des laminarisierten Stroms gelenkt ist.
9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Kollektor der Einrichtung zur Laminarisierung mit Versorgungsleitungen (15, 16) für Bestandteile in Form von Flüssigkeiten, pulverisierten Strahlen oder Gas vorgesehen ist.
10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** diese eine Massenelektrode (25), kreisförmig, koaxial mit dem laminarisierten Strahl und das Innere der Laminarisierungszone umgebend vorgesehen ist, derart, dass die Entladung in der Laminarisierungszone des erzeugten Strahls lokalisiert ist.
11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** zwei Elektroden (1), parallel oder unter einem bestimmten Winkel divergierend in Bezug zu der Symmetrieachse eines Generators mittels der Metallstifte (7) und eines Metallkegels (8) mit einer Wechselstromquelle (9) verbunden sind, derart, dass zwischen den Elektroden (1) eine Hochspannungsentladung in Form eines Plasmastrangs mit praktisch konstantem Querschnitt gezündet wird.
12. Vorrichtung nach dem vorhergehenden Ansprüchen, **dadurch gekennzeichnet, dass** der die Zündung der Entladung zwischen den Elektroden (1) erlaubende Metallkegel (8) durch einen in Längsrichtung durchbohrten Körper (35) ersetzt wird, welcher es erlaubt, den hydrodynamischen Widerstand zu vermindern.
13. Vorrichtung nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Metallkegel (8) durch radiale Metallplatten (36) ersetzt wird, welche auf den Elektroden (1) fixiert sind und in der Weise ausgebildet sind, dass der Abstand zwischen den Platten in dem am weitesten stromaufwärts vom axialen Gasstrom liegenden Bereich der Elektroden minimal ist.

Claims

1. Method for generating an axisymmetrical jet of non-isothermal plasma by means of a high voltage electric discharge in a gas flow involving:
 - placing at least two electrodes (1) to form an electric arc (4);
 - placing a direct or alternating current source (9);
 - connecting each of the electrodes (1) to the current source (9);
 - placing a gas distributor (6) to introduce a stream of gas into the arc formation zone (4);**characterized in that** the method further involves
 - Connecting each of the electrodes (1) to the current source (9) by means of a metal rod (7);
 - placing near to the metal rods (7) a metal cone (8), which is connected to the current source (9) by means of a capacitor (10) and which can be moved along its axis so as to vary the distance separating it from the metal rods (7), said metal cone (8) enabling the initiation of the discharge between the metal rods (7), so that the electric arc is propelled by the electromagnetic force and the drag force exerted by the stream of gas along the metal rods (7) and the electrodes (1);
 - and
 - placing in the gas distributor (6) a device for forming the velocity profile (14) of the gas so that the stream of gas propelling the electric arc is stabilized at all points of the resulting plasma, where the condition of stabilization is obtained by imposing a velocity profile that satisfies a relationship of the type:

$$r^* < D^*: \quad V^*(r^*) = 1.$$

$$D^* \leq r^* \leq 1: \quad V^*(r^*) = 1 - \cos [\pi(r^*-1)/(D^*-1)],$$

and so that the condition of hydrodynamic stabilisation of the arc is met:

$$V \leq Re^* \cdot \eta / \rho \cdot D,$$

in which

$$D^* = D/D_0; \quad r^* = 2r/D_0;$$

D and D₀ are respectively the outer diameter of the jet, and the diameter of the laminarization zone and D ≤ D₀; r is the radius of the point in the jet where the normal speed V is determined; V₀ is the speed of the laminarized flow.

Re* is the critical Reynolds of the stabilized flow,

η and ρ are respectively the dynamic viscosity and the density of the gas propelling it at the temperature of the propellant stream.

2. Method according to claim 1 **characterized in that** the arc is subjected to the effect of magnetic fields perpendicular to the electric current.
3. Method according to one of the preceding claims, **characterised in that** the electric current of the arc or arcs is directed parallel or at angles $\delta \leq 90^\circ$ relative to the axis of flow of the propellant gas and $\delta \leq 90^\circ$ relative to the tangent to the circle on which hydrodynamic-type baffles (3) are positioned creating a swirling movement in the plasma cords (1).
4. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the stream of propelling gas contains molecular components, for example water vapour, which decompose into metastable excited particles and radicals in contact with nonthermal plasma.
5. Device for implementing the method for generating an axisymmetrical jet of non-isothermal plasma according to claims 1 to 4, comprising at least
 - two electrodes (1) supplied with single or 3-phase direct or alternating current to generate an electric arc (4) between them;
 - a direct or alternating current source (9);
 - a gas distributor (6) to introduce a stream of gas into the arc formation zone (4);**characterized in that**
 each of the electrodes (1) is connected by means of a metal rod (7) to the current source (9);
and in that
 the device further comprises a metal cone (8), which is connected to the current source (9) by means of a capacitor (10) and which can be moved along its axis so as to vary the distance separating it from the metal rods (7), said metal cone (8) enabling the initiation of the discharge between the metal rods (7);
and in that
 the gas distributor (6) comprises
 - an inlet manifold (12),
 - a device for forming the velocity profile (14) of the gas; and a grille-screen (13).

6. Device according to claim 5, **characterized in that** the device for forming the velocity profile (14) of the stream of

propelling gas (28) is an axisymmetrical system of coaxial tubes arranged in a honeycomb pattern and crossed longitudinally by the conductive supports of the electrodes, the axis of the tubes being parallel to the axis of flow and the current length of the tubes inversely proportional to the local velocity of the gas stream as determined in claim 1.

- 5 7. Device according to either claim 5 or claim 6, **characterized in that** the device for forming the velocity profile (14) of the stream of propelling gas (28) comprises a manifold (12), a sudden-expansion ring (27) and a grille-screen (13).
- 10 8. Device according to either claim 6 or claim 7, **characterized in that** it comprises solenoids (31) traversed by a direct or alternating electric current, in particular synchronized with the current supplying the discharge, the solenoids being arranged so as to create a magnetic field directed at an angle β between 0° and 90° inclusive relative to the direction of the discharge current and at an angle γ between 0° and 90° relative to the direction of the laminarized flow.
- 15 9. Device according to one of claims 5 to 8, **characterized in that** the manifold of the laminarization device is provided with ducts (15, 16) for adding components in liquid, pulverized jet or gas form.
- 20 10. Device according to one of claims 5 to 9 **characterized in that** it is provided with an earthed electrode (25), circular so as to localize the discharge in the laminarization zone of the jet generated.
- 25 11. Device according to one of claims 5 to 10, **characterized in that** two electrodes (1), parallel or diverging at a given angle relative to the axis of symmetry of a generator are connected by means of metal rods (7) and a metal cone (8) to a source of alternating current (9) so as to initiate between said electrodes (1) a high voltage discharge in the form of a cord of plasma of practically constant cross section.
- 30 12. Device according to the previous claim, **characterized in that** the metal cone (8) enabling the initiation of the discharge between the electrodes (1) is replaced by a longitudinally milled body (35), which enables its hydrodynamic resistance to be reduced.
- 35 13. Device according to claim 11 **characterized in that** the metal cone 8 is replaced by radial metal plates (36) fixed onto the electrodes (1) and designed in such a way that the distance between the plates is minimal in the part of the electrodes the furthest upstream in the axial gas flow.
- 40
- 45
- 50
- 55

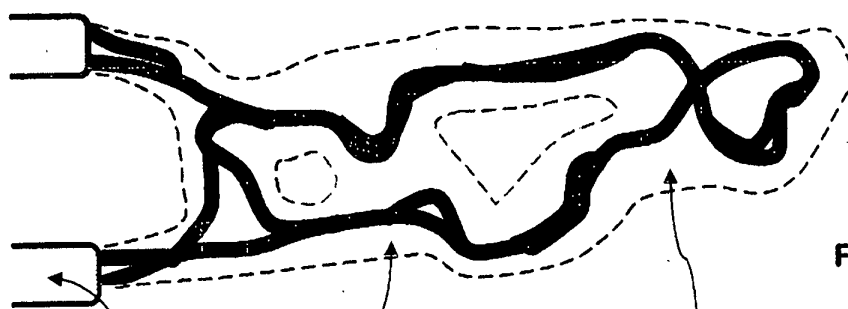


Fig. 1 "a"

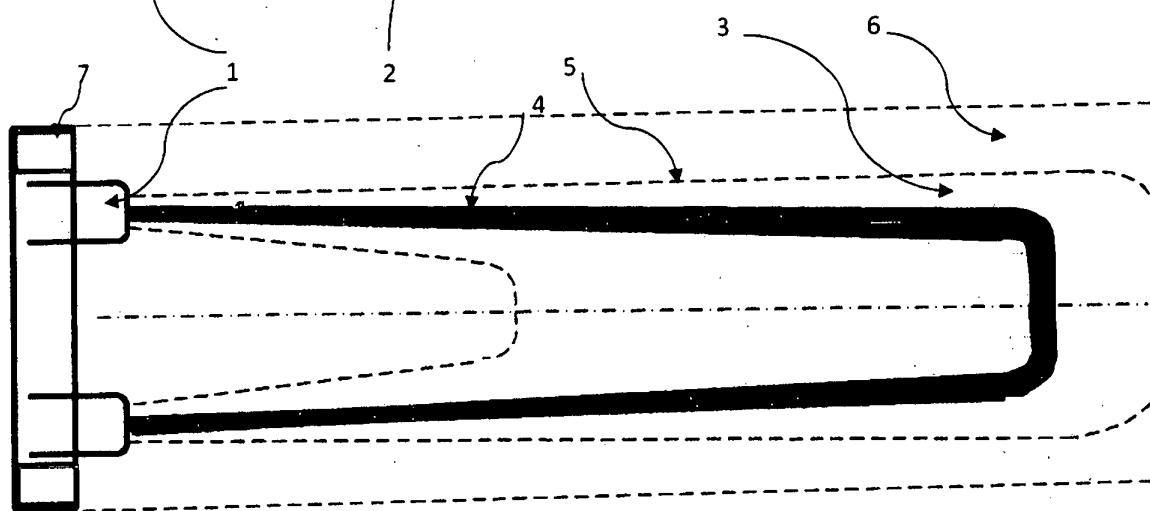


Fig. 1"b"

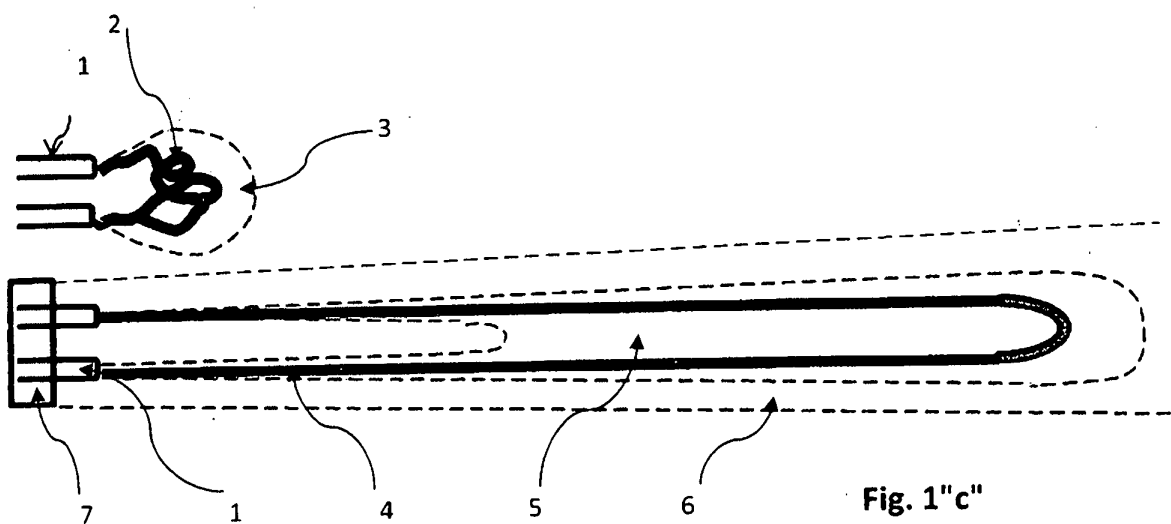


Fig. 1" c"

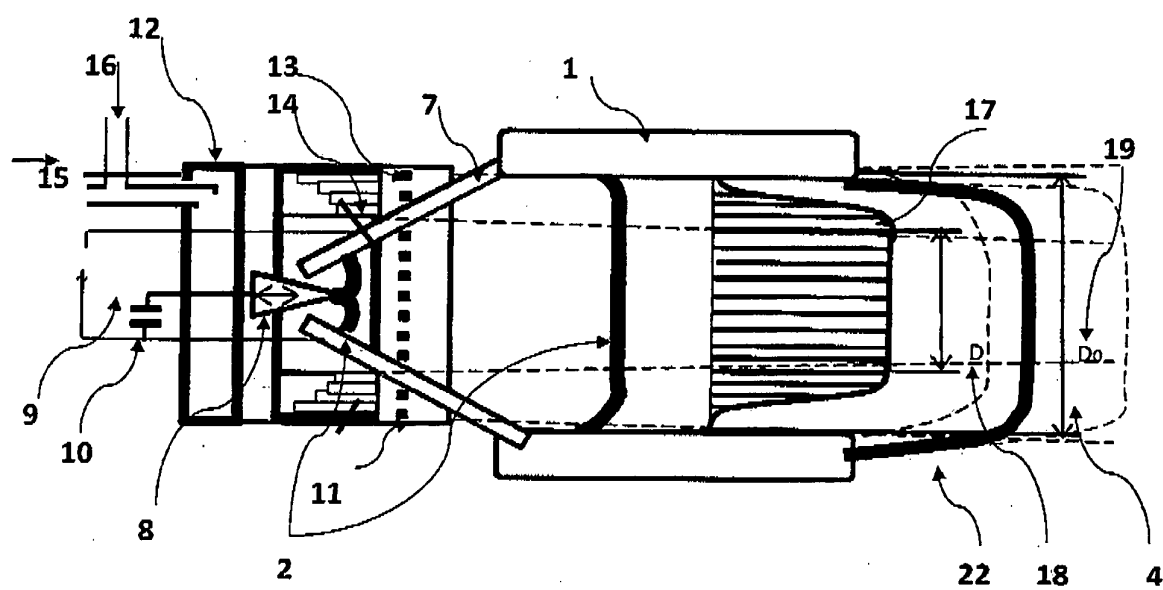


Fig. 2a

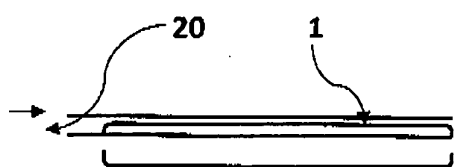


Fig. 2b

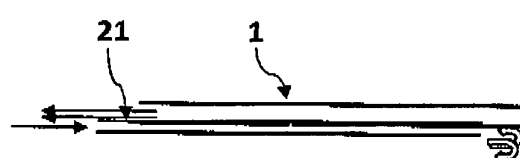


Fig. 2c

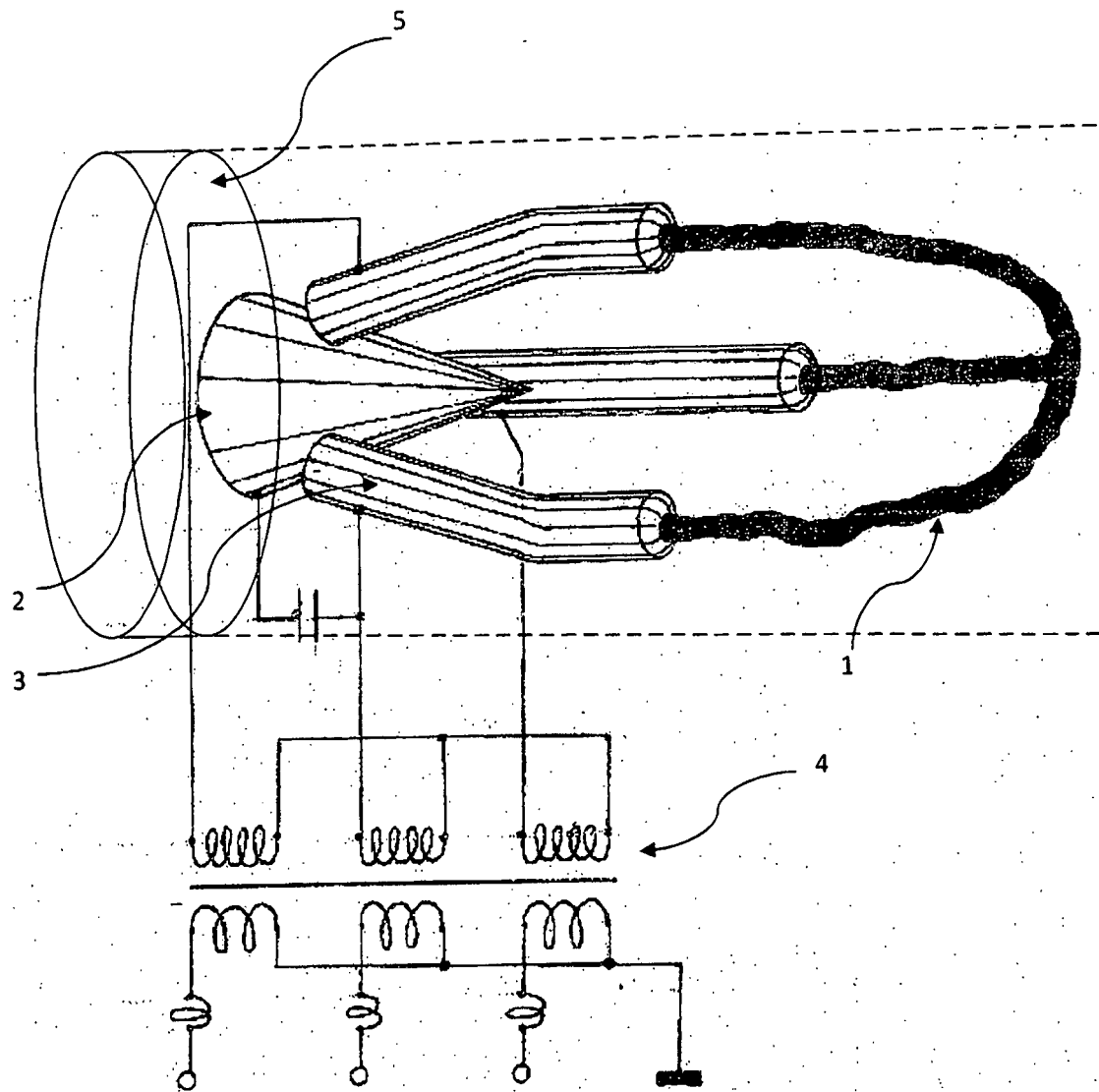


Figure 3

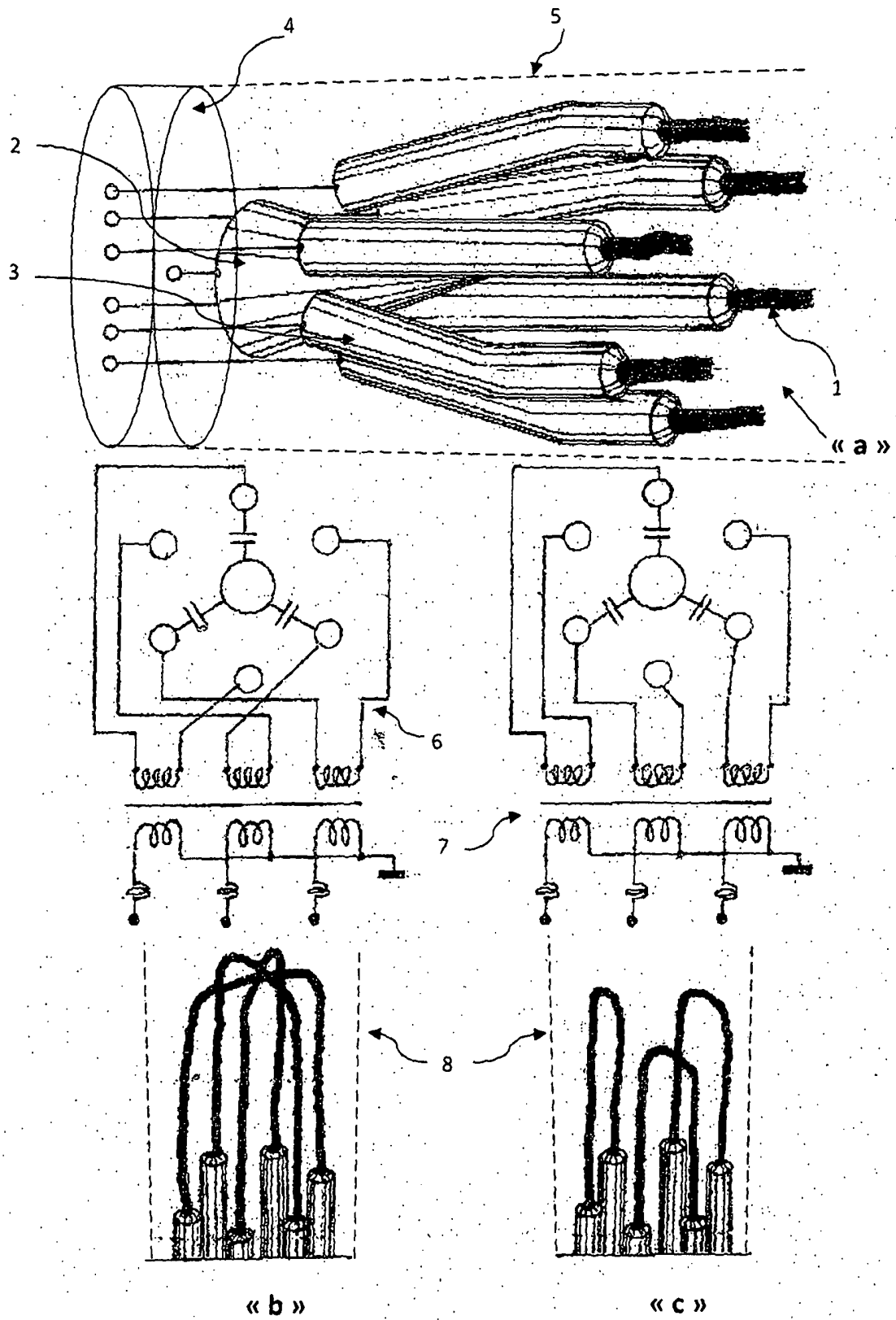


Figure 4

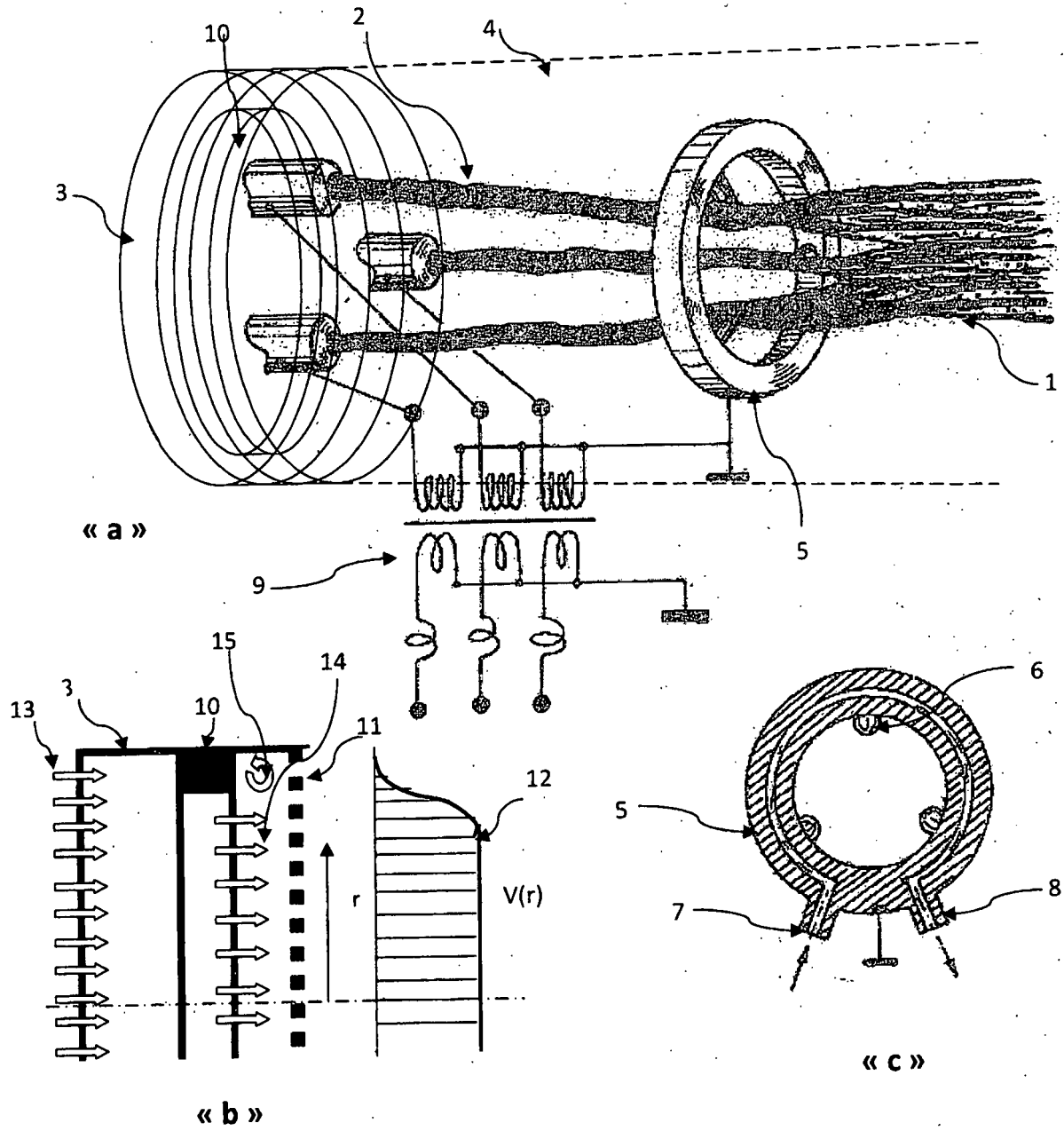


Figure 5

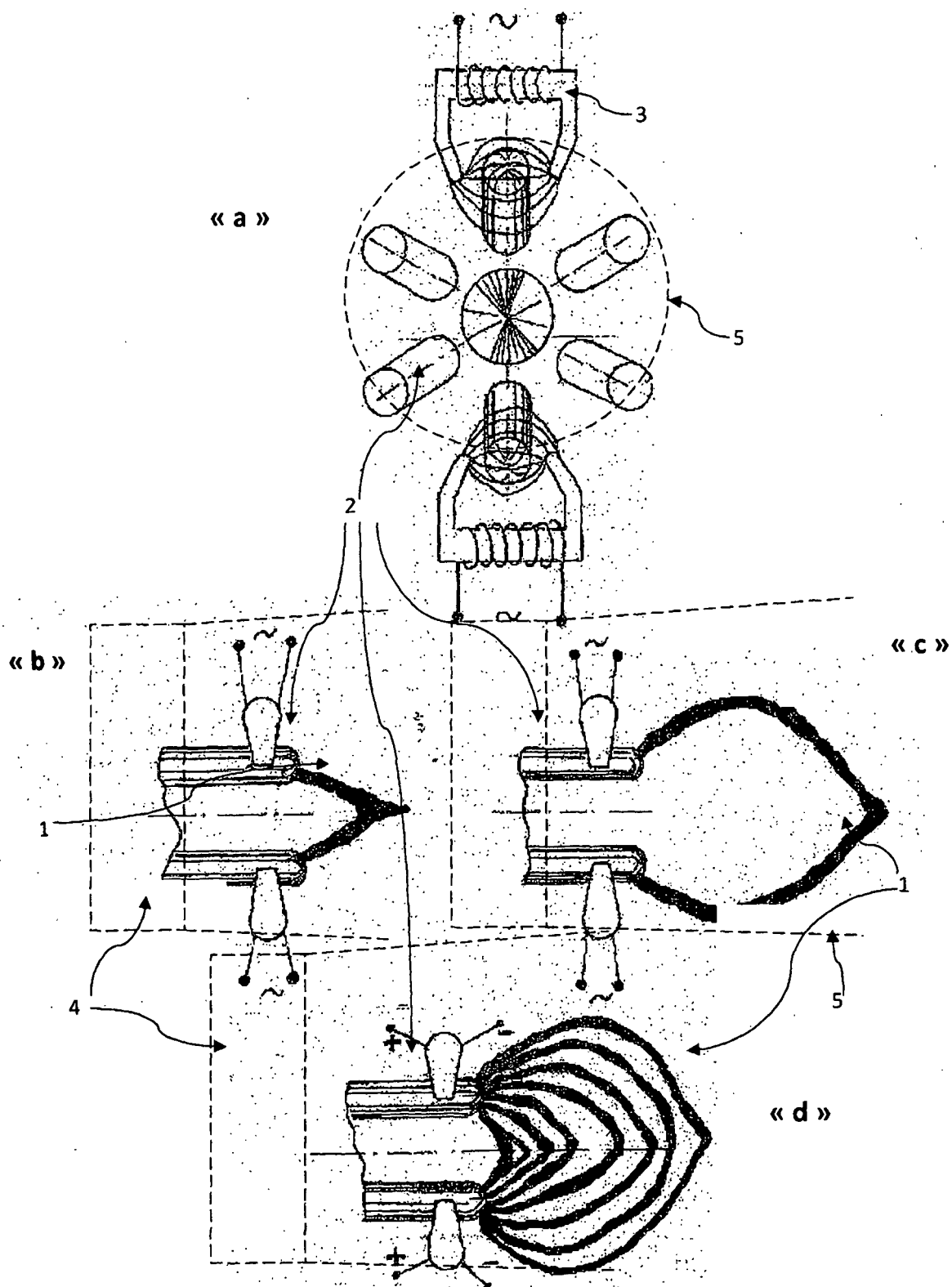


Figure 6

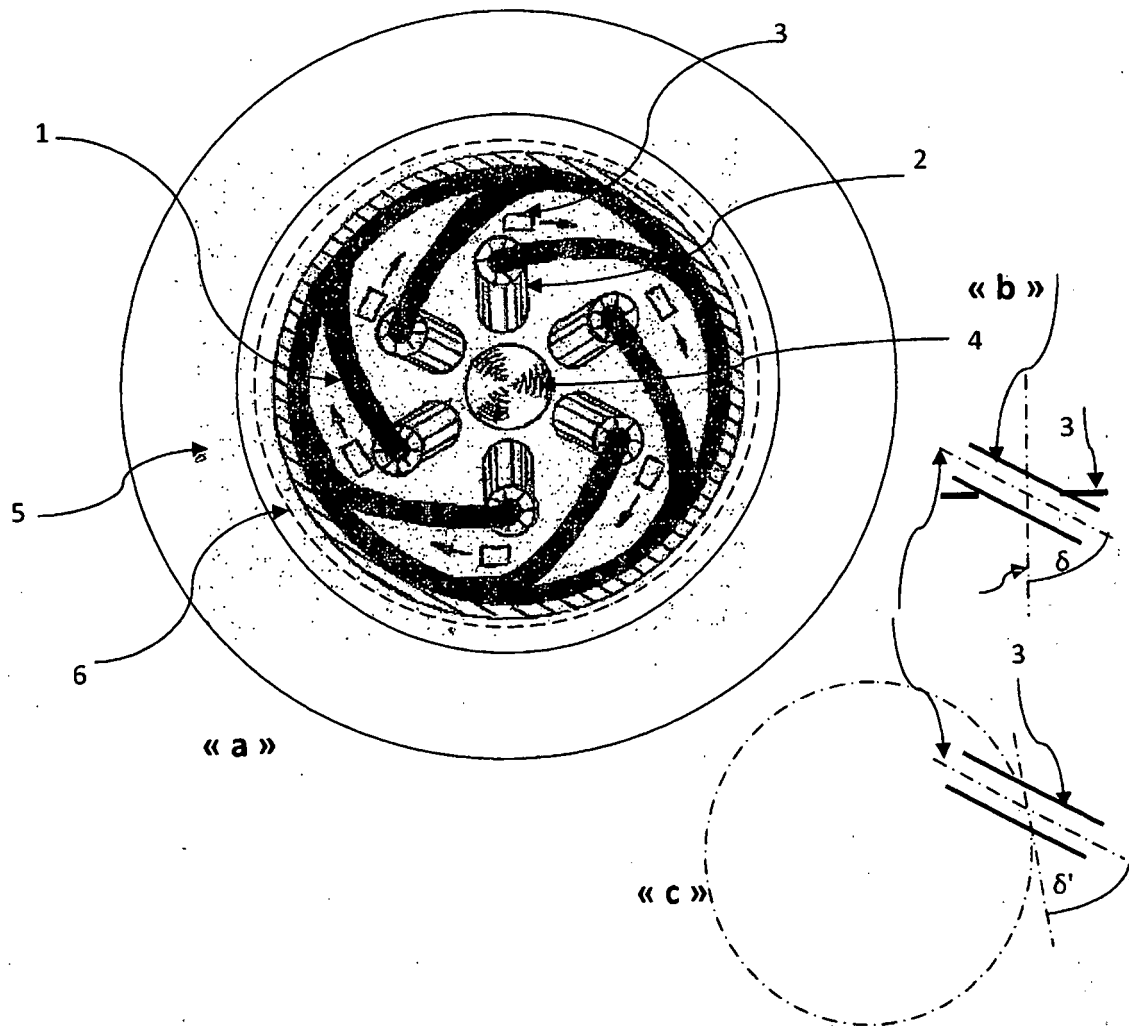


Figure 7

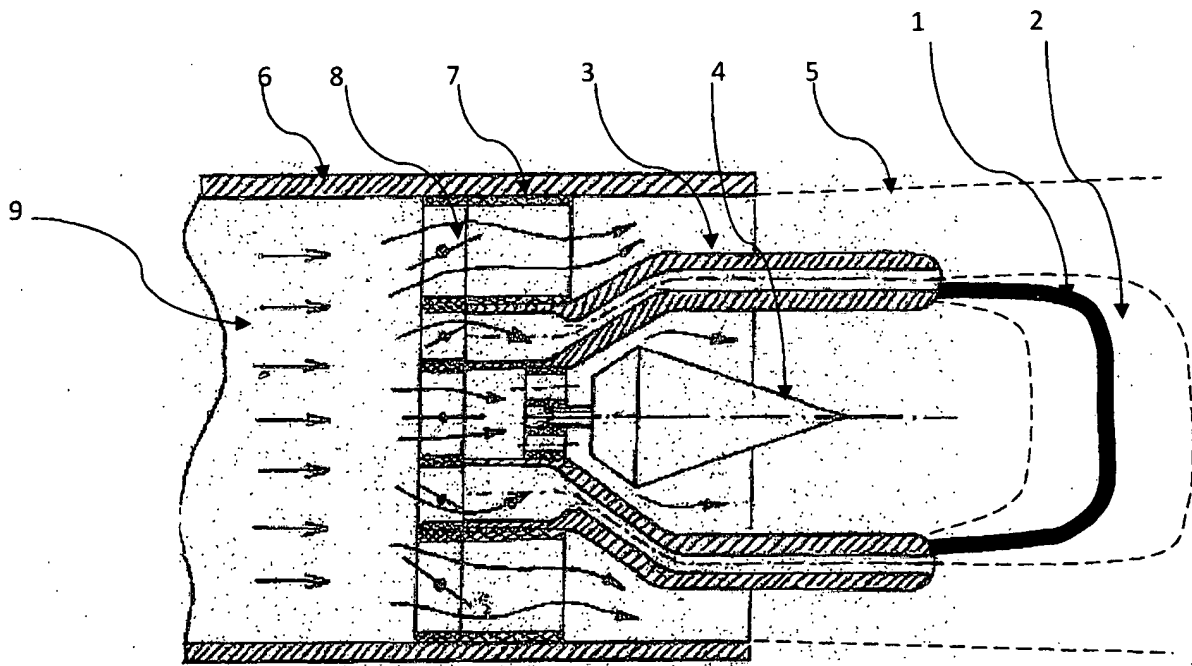


Figure 8

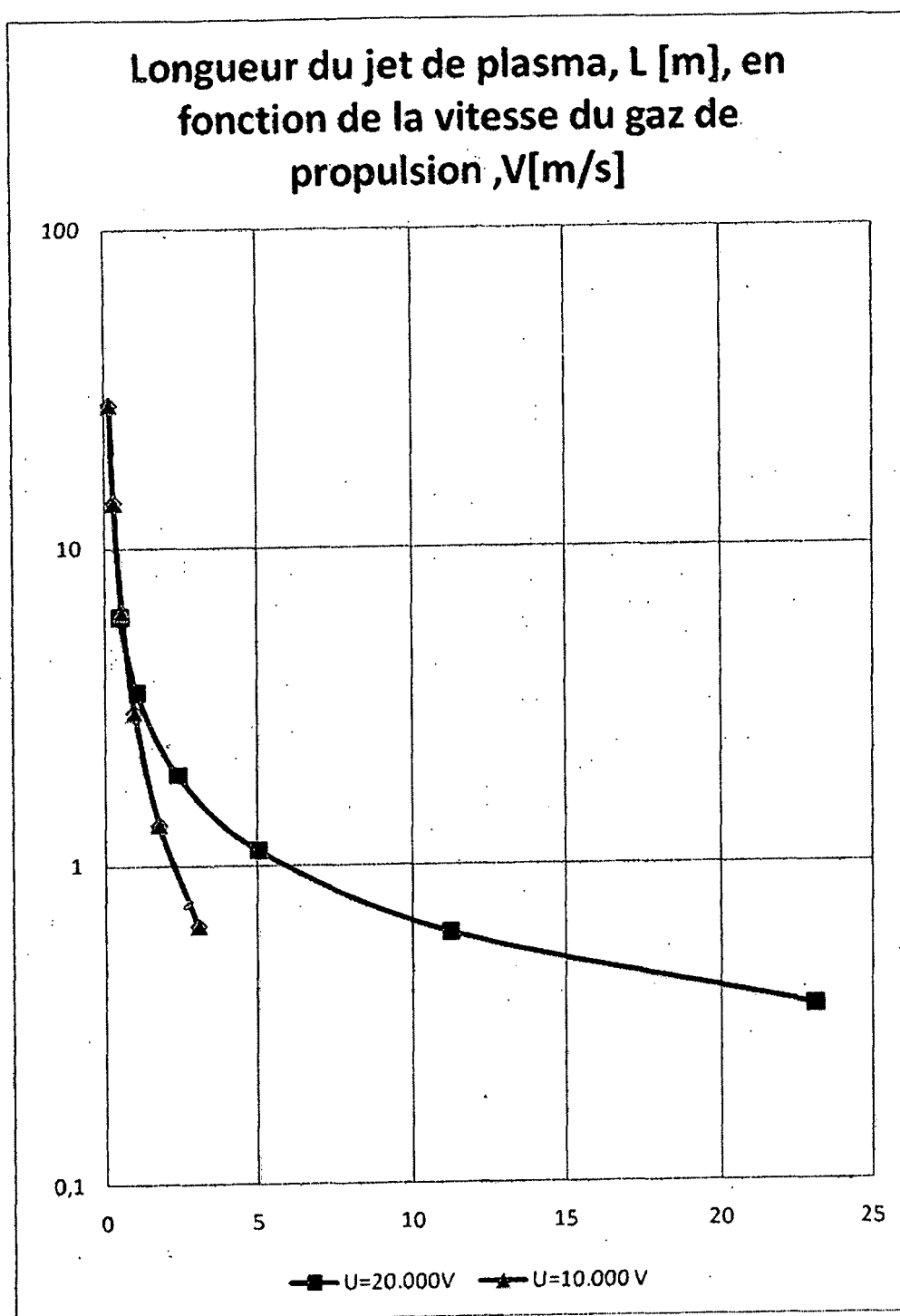


Figure 9

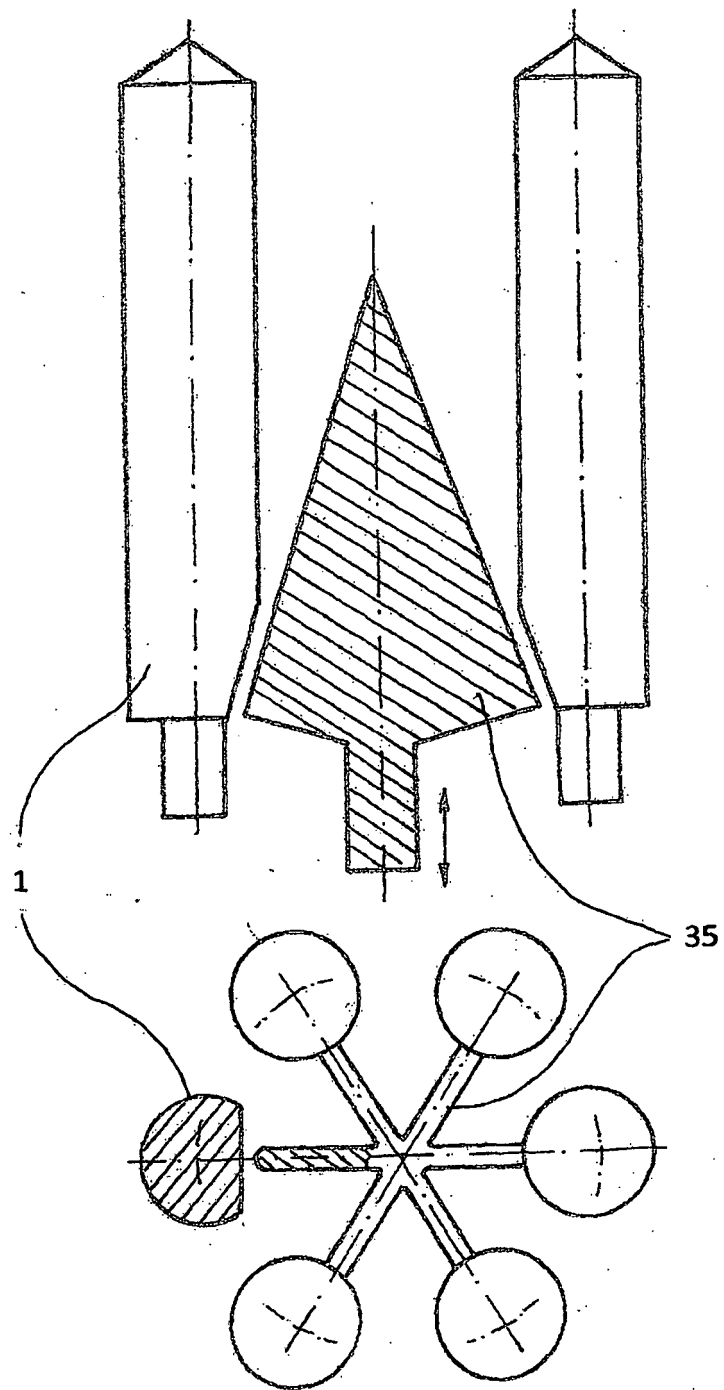


Fig. 10

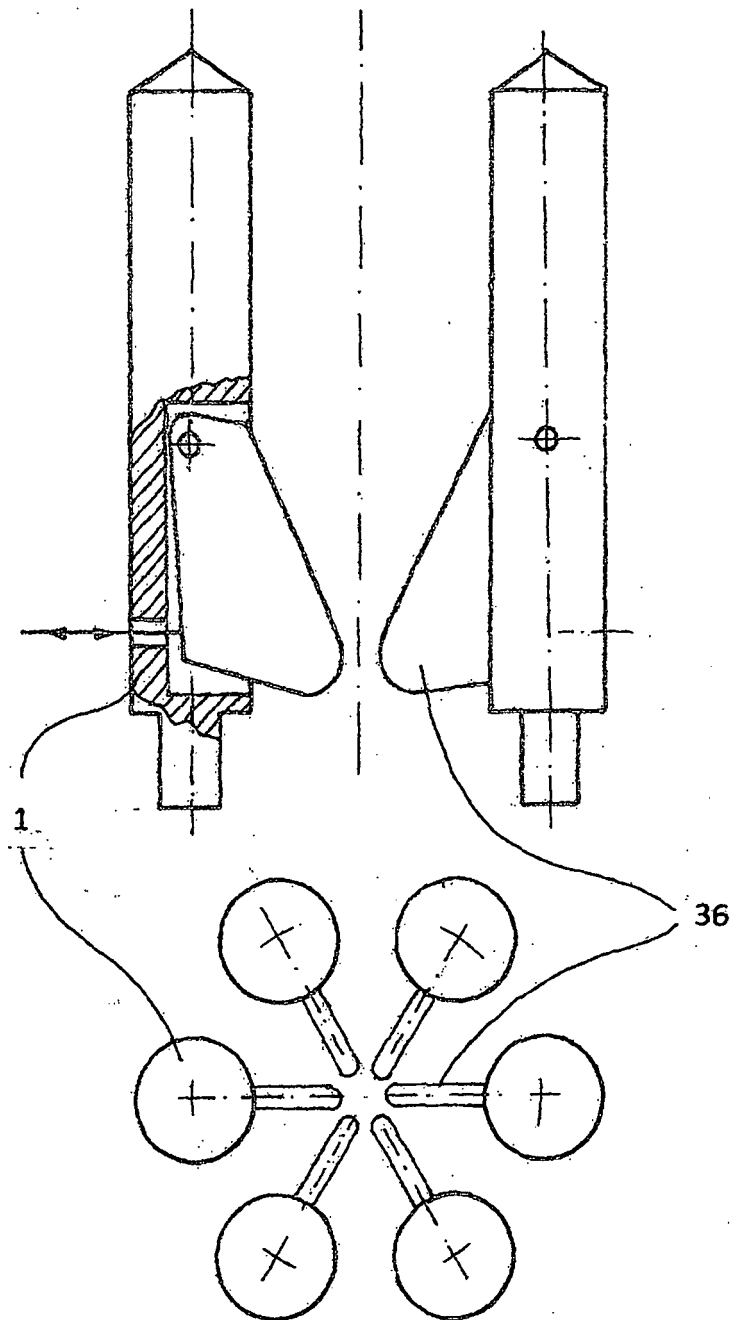


Fig. 11

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Littérature non-brevet citée dans la description

- **ZHUKOV M.F.** *Ser. Techn.Nauk*, 1970, vol. 2 (58), 12-18 [0012]
- **BUROV I.S. ; ERMOLAEVA E.M. ; MOSSE A.L.** *Minsk ITMO*, 1975, 71-78 [0012]
- **ENGELSHT V. S. ; SAICHENKO A.N. ; OKOPNIK G.M. ; MUSIN N.U.** XI Vsesoyuznaya Konf. Po generatoram nizkotemperaturnoy plazmi. *Novosibirsk*, 1989, 255 [0015]
- Plasma Jets in the Development of New Materials Technology. **DESIATKOV G.A. ; ENGUELSHT V.S. ; SAICHENKO A.N. ; MUSIN N.U. et al.** Proc. Of the International Workshop. VSP, 499-509 [0015]
- **LEE et al.** Optimization scheme of a rotating gliding arc reactor for partial oxidation of methane. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, vol. 31, 3343-3351 [0015]