

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **235841**
(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **423902**

(22) Data zgłoszenia: **14.12.2017**

(51) Int.Cl.
F02K 9/10 (2006.01)
F42B 1/024 (2006.01)
F42B 10/40 (2006.01)

(54) **Ziarno materiału pędnego do silnika rakietowego o wydłużonym czasie pracy**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
17.06.2019 BUP 13/19

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
02.11.2020 WUP 17/20

(73) Uprawniony z patentu:
**SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ – INSTYTUT
LOTNICTWA, Warszawa, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:
PIOTR WOLAŃSKI, Warszawa, PL
ADAM OKNIŃSKI, Warszawa, PL

PL 235841 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest ziarno materiału pędnego do silnika raketowego o wydłużonym czasie pracy, posiadające co najmniej jedną wewnętrzną przegrodę o właściwościach termoizolacyjnych wbudowaną w ziarno ze stałego materiału pędnego o symetrii osiowej, wydłużającą drogę spalania materiału pędnego względem usytuowanej współosiowo dyszy silnika raketowego.

Wśród silników raketowych wykorzystujących stały materiał pędny wyróżnia się silniki o czołowym (papierosowym) spalaniu ziarna, które pozwalają na osiągnięcie relatywnie długich czasów pracy. Rozwiązanie to jest stosowane w silnikach marszowych rakiet wojskowych oraz w gazogeneratorach kosmicznych, lotniczych i przemysłowych. W przypadku niektórych zastosowań niezbędne są wyjątkowo długie czasy pracy, co wymaga wykorzystania materiałów pędnych o bardzo niskich prędkościach spalania, które nie dają najwyższych możliwych osiągnięć.

Stosowane silniki marszowe i gazogeneratory wykorzystują stałe materiały pędne modyfikowane pod kątem redukcji prędkości spalania. Obecnie wytwarzane ziarna do silników o bardzo długim czasie pracy stanowią w przybliżeniu walec z inhibitowaną powierzchnią boczną. Spalanie odbywa się na powierzchni czołowej walca. Tego typu rozwiązanie posiada szereg wad, z których najważniejsze to duże wydłużenie silnika i brak możliwości zmniejszenia wartości ciągu poniżej pewnej wartości – wynikającej między innymi z wydatku masowego z powierzchni czołowej walca.

Alternatywnym rozwiązaniem jest kontrolowanie szybkości spalania ziarna poprzez rozwinięcie powierzchni wewnętrznej ziarna materiału pędnego lub zastosowanie wewnętrznych przegród. W rozwiązaniu przedstawionym w opisie patentowym US6431072 wewnątrz jednorodnego ziarna są uformowane rowki usytuowane normalnie do osi ziarna lub pojedynczy spiralny rowek. Opis patentowy US4578947 przedstawia jednolite ziarno materiału pędnego złożone z rdzenia i cylindrycznej części obwodowej, połączonych ze sobą krótkim fragmentem podstawy usytuowanej po przeciwnej stronie dyszy. W rozwiązaniu tym średnica rdzenia jest co najmniej dwukrotnie większa od grubości ścianki części obwodowej. W rozwiązaniu, przedstawionym w opisie patentowym GB933847, w celu wydłużenia drogi spalania ładunek materiału pędnego został rozdzielony wzdłuż długości na dwie lub więcej sekcji przez ukształtowaną spiralnie blachę pokrytą materiałem ogniotrwałym. Opis patentowy US4534293 przedstawia ziarno w kształcie spiralnych zwojów. Opis patentowy US3286462 przedstawia ziarno materiału pędnego o zróżnicowanym przekroju poprzecznym zwojów upakowanych spiralnie, wzdłużnie lub poprzecznie w komorze spalania i otoczonych izolacją termiczną.

Rozwiązania te nie zapewniają odpowiednio długiego czasu pracy, dobrego upakowania podsystemu i zachowania niskiej masy silnika, wymaganych dla licznych zastosowań w technice raketowej.

Ziarno materiału pędnego do silnika raketowego o wydłużonym czasie pracy, posiadające co najmniej jedną wewnętrzną przegrodę o właściwościach termoizolacyjnych wbudowaną w osiowo symetryczne ziarno, wydłużającą drogę spalania stałego materiału pędnego względem dyszy silnika raketowego, według wynalazku charakteryzuje się tym, że przegrodę stanowi co najmniej jedna płyta o średnicy mniejszej od średnicy ziarna, usytuowana koncentrycznie w osi ziarna.

Korzystnym jest, jeżeli płyta ma co najmniej warstwę wierzchnią wykonaną z materiału inhibitującego spalanie.

Korzystnym jest, jeżeli pomiędzy dwiema płytami usytuowanymi koncentrycznie w osi ziarna jest umieszczona w płaszczyźnie równoległej pierścieniowa płyta o średnicy zewnętrznej równej średnicy ziarna i szerokości części pierścieniowej większej od szerokości szczeliny pomiędzy płytą a zewnętrznym obwodem ziarna.

Korzystnym jest także, jeżeli pierścieniowa płyta ma co najmniej warstwę wierzchnią wykonaną z materiału inhibitującego spalanie.

Inne ziarno materiału pędnego do silnika raketowego o wydłużonym czasie pracy, posiadające co najmniej jedną wewnętrzną przegrodę o właściwościach termoizolacyjnych wbudowaną w osiowo symetryczne ziarno, wydłużającą drogę spalania stałego materiału pędnego względem dyszy silnika raketowego, według wynalazku charakteryzuje się tym, że przegrodę stanowi co najmniej jeden pierścień w kształcie odcinka rury o długości mniejszej od długości ziarna, usytuowany koncentrycznie w osi ziarna i przylegający dolną krawędzią do podstawy ziarna od strony dyszy.

Korzystnym jest, jeżeli pierścień ma co najmniej warstwę wierzchnią wykonaną z materiału inhibitującego spalanie.

Korzystnym jest, jeżeli pomiędzy pierwszym pierścieniem a zewnętrznym obwodem ziarna jest umieszczony współosiowo drugi pierścień w kształcie odcinka rury o długości mniejszej od długości ziarna, przylegający górną krawędzią do przeciwległej podstawy ziarna.

Korzystnym jest także, jeżeli drugi pierścień ma co najmniej warstwę wierzchnią wykonaną z materiału inhibitującego spalanie.

Wynalazek umożliwia zmniejszenie powierzchni spalania poniżej wartości typowej dla silników o spalaniu papierosowym, bez potrzeby modyfikacji materiału pędnego. Jest to realizowane poprzez wydłużenie drogi spalania za pomocą odpowiednich przegród, które mogą być dodatkowo pokryte inhibitorem, przy niemal pełnym wypełnieniu objętości komory spalania materiałem pędnym. Ponadto w każdej odmianie wynalazku zachowana jest symetria osiowa geometrii ziarna, zbliżona do walca, co pozwala na zachowanie położenia środka masy silnika na jego osi podłużnej podczas całego czasu trwania misji.

Wynalazek jest objaśniony w przykładzie wykonania przedstawionym na rysunku, na którym fig. 1a przedstawia silnik raketowy z ziarnem materiału pędnego o spalaniu labiryntowym w półprzekroju osiowym, fig. 1b przedstawia silnik raketowy z ziarnem materiału pędnego o spalaniu wzdłużnym w półprzekroju osiowym, fig. 2 przedstawia wykres zależności powierzchni spalania od długości drogi przebytej przez front płomienia dla ziarna przedstawionego na fig. 1, fig. 3a przedstawia silnik raketowy z innym ziarnem materiału pędnego o spalaniu labiryntowym w półprzekroju osiowym, fig. 3b przedstawia silnik raketowy z innym ziarnem materiału pędnego o spalaniu wzdłużnym w półprzekroju osiowym, fig. 4a przedstawia fragment silnika z fig. 1 w początkowej fazie spalania, fig. 4b przedstawia fragment silnika z fig. 1 w końcowej fazie spalania. Fig. 1a – 4b stanowią uproszczone rysunki różnych wariantów silników wykorzystujących istotę wynalazku. Dla uproszczenia nie zaznaczano ścianek nośnych komory spalania, ani warstw inhibitorów poza przegrodami.

Jak przedstawiono na fig. 1 a, ziarno materiału pędnego do silnika raketowego o wydłużonym czasie pracy, posiada wewnętrzną przegrodę o właściwościach termoizolacyjnych wbudowaną w osiowo symetryczne ziarno, zasadniczo w kształcie walca, wydłużającą drogę spalania stałego materiału pędnego w kierunku osiowym pokrywającą się z osią dyszy 6 silnika raketowego. W podstawowej konfiguracji przegrodę stanowi płyta 3 o średnicy mniejszej od średnicy ziarna, usytuowana koncentrycznie w osi ziarna. Jak przedstawiono na fig. 3b, konfiguracja ta może być rozbudowana poprzez dołożenie kolejnej płyty 3 usytuowanej koncentrycznie w osi ziarna i umieszczenie w płaszczyźnie równoległej pomiędzy dwiema płytami 3 pierścieniowej płyty 4 o średnicy równej średnicy ziarna i szerokości części pierścieniowej większej od szerokości szczeliny pomiędzy płytą 3 a zewnętrznym obwodem ziarna. Konfiguracja umożliwia dokładanie naprzemiennie kolejnych płyt, dalej wydłużając czas spalania silnika. Płyta 3 oraz pierścieniowa płyta 4 mają co najmniej warstwę wierzchnią wykonaną z materiału inhibitującego spalanie, czyli z materiału nie palnego i odpornego na działanie wysokiej temperatury. Mogą być także wykonane w całości z inhibitora. Opisana konfiguracja zapewnia labiryntowe spalanie ziarna. Z racji długich czasów spalania silnik powinien mieć wewnętrzną izolację termiczną 7.

Jak przedstawiono na fig. 1b, inne ziarno materiału pędnego do silnika raketowego o wydłużonym czasie pracy, ma wewnętrzną przegrodę o właściwościach termoizolacyjnych wbudowaną w osiowo symetryczne ziarno, w kształcie zbliżonym do walca, wydłużającą drogę spalania stałego materiału pędnego względem usytuowanej współosiowo dyszy silnika raketowego. W podstawowej konfiguracji przegrodę stanowi pierścień 1 w kształcie odcinka rury o długości mniejszej od długości ziarna, usytuowany koncentrycznie w osi ziarna i przylegający dolną krawędzią do podstawy ziarna od strony dyszy 6. Jak przedstawiono na fig. 3a, konfiguracja ta może być rozbudowana poprzez dołożenie drugiego pierścienia 2 w kształcie odcinka rury o większej średnicy i długości mniejszej od długości ziarna, przylegającego górną krawędzią do przeciwległej podstawy ziarna. Konfiguracja umożliwia dokładanie naprzemiennie kolejnych pierścieni, dalej wydłużając czas spalania silnika. Ścianki pierścieni 1, 2 mają co najmniej warstwę wierzchnią wykonaną z materiału inhibitującego spalanie. Pierścienie 1, 2 mogą być także wykonane w całości z inhibitora. W przypadku dodania kolejnych pierścieni, ich krawędzie powinny przylegać na przemian do przeciwległej podstawy ziarna. Konfiguracja ta zapewnia wzdłużne spalanie ziarna. Z racji długich czasów spalania silnik powinien mieć wewnętrzną izolację termiczną 7.

Jak przedstawiono na fig. 2, powierzchnia spalania zależy od długości drogi przebytej przez front płomienia. Może być optymalizowana na etapie projektowania silnika poprzez dobór geometrii i położenia przegród w materiale pędnym. Przy optymalizacji geometrii przegród i izolacji możliwe jest uzyskanie wykresu ciągu zbliżonego do stałego w czasie, ponadto możliwe jest uzyskanie stopniowo malejącego ciągu co byłoby istotne w przypadku deorbitacji dużych satelitów z rozłożonymi panelami słonecznymi.

Jak przedstawiono na fig. 4a, 4b, niektóre fragmenty przegrody pokryte warstwą inhibitora, stanowiące jednocześnie warstwę izolację termiczną wewnątrz ziarna, nie muszą zachować integralności w danej fazie spalania. Obszar kreskowany wskazuje na fragmenty, których degradacja podczas pracy silnika jest dopuszczalna w kolejnych fazach spalania. W miarę możliwości część ziarna położonego bliżej ścianki nośnej silnika powinna spalać się w późniejszej fazie pracy, tak by nie narażać struktury na zbyt wysokie obciążenia cieplne i zminimalizować masę izolacji termicznej 7. Ponadto same przegrody muszą spełniać także funkcję izolatora termicznego, by nie wystąpił samozapłon części ładunku znajdującej się po przeciwnej stronie danej przegrody w skutek nagrzewania się stałego materiału pędnego 5. Ewentualna degradacja i rozpad przegrody po wypaleniu stałego materiału pędnego 5 w danej części silnika nie stanowi problemu, ponieważ niepalna warstwa nie musi utrzymywać integralności przez cały czas trwania pracy silnika. Fragmenty te po przejściu płomienia nie są potrzebne, a na początku nie są narażone na oddziaływanie płomienia. Możliwe jest delikatne nacięcie przegród tak, by po przejściu płomienia następowała ich dezintegracja w zadanym rejonie. Częściowe nacięcia powinny zapewnić odrywanie elementów przegród o wymiarach mniejszych niż średnica przekroju krytycznego dyszy 6, by nie stanowiły zagrożenia dla pracy silnika. Kontrolowana fragmentacja wzdłuż nacięć zwiększa powierzchnię przepływu gazów w komorze spalania i zmniejsza ryzyko zatkania dyszy 6. W zależności od stosowanego inhibitora i izolacji silnik może wymagać zastosowania rusztu w części zbieżnej dyszy 6.

Wytworzenie ziarna może być zrealizowane poprzez proces odlewania zawiesziny lepiszcza z utleniaczem. Ziarno o spalaniu wzdłużnym może być wytwarzane poprzez umieszczenie w rurowej formie odlewniczej inhibitora z odpowiednio przygotowanymi powierzchniami przyszłego styku ze stałym materiałem pędnym (5) i zalanie zawiesiną nieutwardzonego materiału pędnego pod obniżonym ciśnieniem. W przypadku ziarna o spalaniu labiryntowym, lub ziarna o spalaniu wzdłużnym z większą ilością przegród, zalewanie może być realizowane w kilku oddzielnych procesach z przerwą na utwardzenie materiału pędnego i nałożenie lub odlanie warstwy inhibitora, który będzie stanowił przegrody. Po wykonaniu danej warstwy inhibitora niezbędna może być jego obróbka mechaniczna i następnie przygotowanie powierzchni zewnętrznej przed odlaniem kolejnej partii zawiesziny materiału pędnego. Przyleganie części ładunku materiału pędnego wytworzonego w trakcie oddzielnych procesów będzie zapewniona poprzez wykorzystanie matrycy polimerowej o odpowiednich właściwościach adhezyjnych, np. opartej na bazie kauczuku, oraz uprzednią obróbkę powierzchniową warstwy na którą odlewany będzie materiał pędny, w tym rozwinięcie powierzchni poprzez naniesienie na tokarce lub frezarce wzoru zagłębień na danej powierzchni wraz z naniesieniem cienkiej warstwy prepolimeru. Zaleca się wykorzystanie tego samego polimeru jako osnowy przegród, jak i lepiszcza w materiale pędnym. Dopuszcza się zautomatyzowane, jak również manualne wykonanie warstwy inhibitora – zarówno nawijanie przesączanych włókien, naklejanie taśm, odlewanie, jak i malowanie.

Rozwiązanie według wynalazku ma szereg zalet, w tym:

- możliwość uzyskania niższego ciągu niż w przypadku ziarna o spalaniu papierosowym;
- zmniejszenie kosztów poprzez brak potrzeby rozwoju unikalnego materiału pędnego dla zastosowań wymagających bardzo długich czasów pracy silnika;
- możliwość zastosowania energetycznego materiału pędnego, bez potrzeby ingerencji w jego skład, zwłaszcza bez pogarszania jego osiągnięć w celu zmniejszenia prędkości spalania; brak wymagania redukcji prędkości spalania pozwala na podwyższenie projektowego ciśnienia pracy silnika i jego osiągnięć;
- możliwość wydłużenia czasu spalania niezależnie od geometrii silnika (nawet w bardzo krótkim silniku możliwe jest uzyskanie czasu spalania na poziomie kilkuset sekund);
- występuje niemal pełne wypełnienie objętości komory spalania materiałem pędnym;
- geometria zewnętrzna pozostaje zbliżona do walca, ułatwiająca produkcję;
- grubości inhibitora wewnątrz ziarna materiału pędnego mogą być bardzo małe z racji braku potrzeby zachowania integralności tych warstw przez większość czasu pracy silnika;
- izolacja otaczająca zewnętrzną część ziarna (przylegająca do ścianek nośnych silnika) nie jest narażona na oddziaływanie produktów spalania przez większość czasu pracy silnika i może być relatywnie cienka ;
- skalowalność rozwiązania – nie ma technicznych przesłanek ku temu by rozwiązanie nie mogło być zastosowane zarówno dla dużych, jak i małych silników.

Poza typowymi gazogeneratorami i silnikami marszowymi raket, rozwiązanie ma bardzo wysoki potencjał aplikacyjny w satelitach. Wynika to z potrzeby deorbitacji satelitów po zakończeniu ich misji, na orbicie bez pozostawiania tak zwanych śmieci kosmicznych. Zgodnie z europejskim prawem kosmicznym nowa generacja satelitów będzie wymagała posiadania tego typu napędów na swoim pokładzie. Silnik na stały materiał pędny o bardzo długim czasie spalania (na poziomie nawet kilkuset sekund) zapewni minimalizację przeciążeń i uniemożliwi zbyt wczesną dezintegrację satelity. Przedstawione rozwiązanie może być rozwijane między innymi w ramach projektów realizowanych w programach Europejskiej Agencji Kosmicznej.

Zastrzeżenia patentowe

1. Ziarno materiału pędneho do silnika raketowego o wydłużonym czasie pracy, posiadające co najmniej jedną wewnętrzną przegrodę o właściwościach termoizolacyjnych wbudowaną w osiowo symetryczne ziarno, wydłużającą drogę spalania stałego materiału pędneho względem dyszy silnika raketowego, **znamienne tym**, że przegrodę stanowi co najmniej jedna płyta (3) o średnicy mniejszej od średnicy ziarna, usytuowana koncentrycznie w osi ziarna.
2. Ziarno według zastrz. 1, **znamienne tym**, że płyta (3) ma co najmniej warstwę wierzchnią wykonaną z materiału inhibitującego spalanie.
3. Ziarno według zastrz. 1, **znamienne tym**, że pomiędzy dwiema płytami (3) usytuowanymi koncentrycznie w osi ziarna jest umieszczona w płaszczyźnie równoległej pierścieniowa płyta (4) o średnicy zewnętrznej równej średnicy ziarna i szerokości części pierścieniowej większej od szerokości szczeliny pomiędzy płytą (3) a zewnętrznym obwodem ziarna.
4. Ziarno według zastrz. 3, **znamienne tym**, że pierścieniowa płyta (4) ma co najmniej warstwę wierzchnią wykonaną z materiału inhibitującego spalanie.
5. Ziarno materiału pędneho do silnika raketowego o wydłużonym czasie pracy, posiadające co najmniej jedną wewnętrzną przegrodę o właściwościach termoizolacyjnych wbudowaną w osiowo symetryczne ziarno, wydłużającą drogę spalania stałego materiału pędneho względem dyszy silnika raketowego, **znamienne tym**, że przegrodę stanowi co najmniej jeden pierścień (1) w kształcie odcinka rury o długości mniejszej od długości ziarna, usytuowany koncentrycznie w osi ziarna i przylegający dolną krawędzią do podstawy ziarna od strony dyszy (6).
6. Ziarno według zastrz. 5, **znamienne tym**, że pierścień (1) ma co najmniej warstwę wierzchnią wykonaną z materiału inhibitującego spalanie.
7. Ziarno według zastrz. 5, **znamienne tym**, że pomiędzy pierwszym pierścieniem (1) a zewnętrznym obwodem ziarna jest umieszczony współosiowo drugi pierścień (2) w kształcie odcinka rury o długości mniejszej od długości ziarna, przylegający górną krawędzią do przeciwległej podstawy ziarna.
8. Ziarno według zastrz. 7, **znamienne tym**, że drugi pierścień (2) ma co najmniej warstwę wierzchnią wykonaną z materiału inhibitującego spalanie.

Rysunki

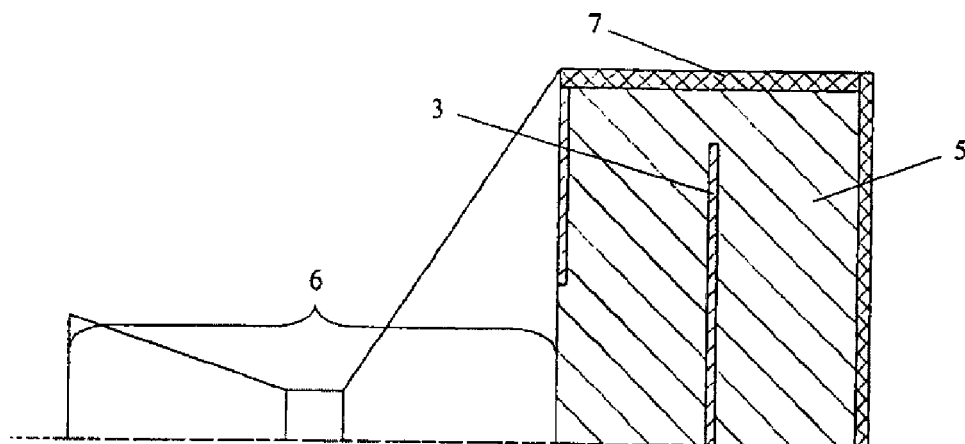


Fig. 1a

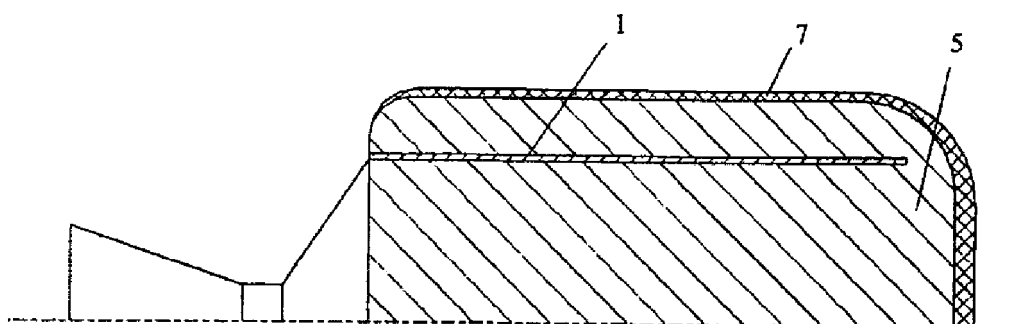


Fig. 1b

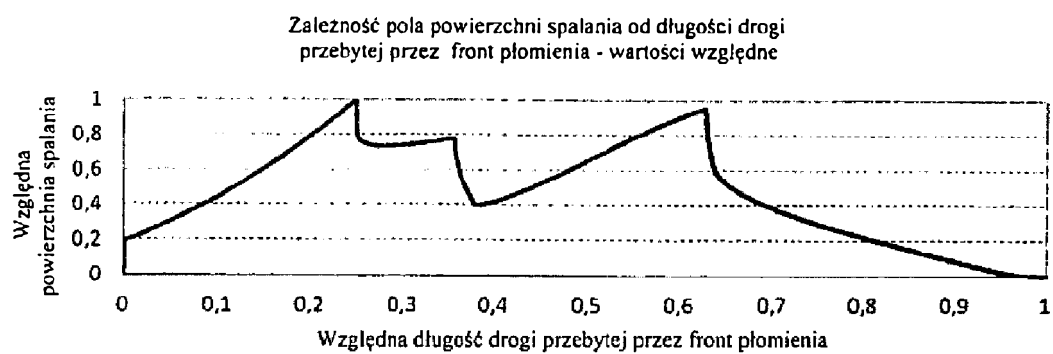


Fig. 2

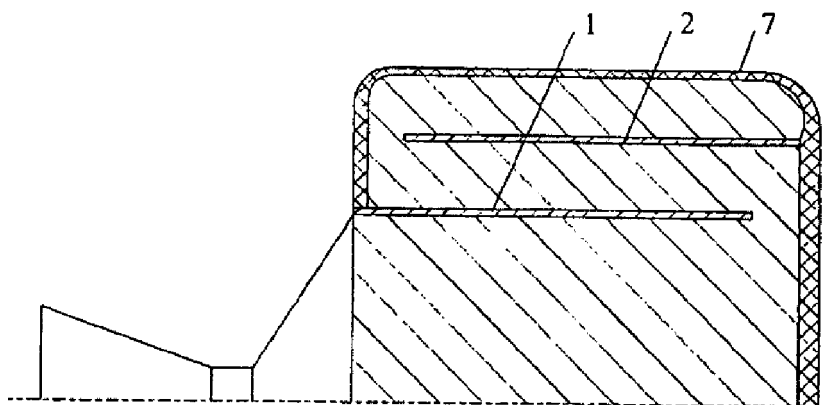


Fig. 3a

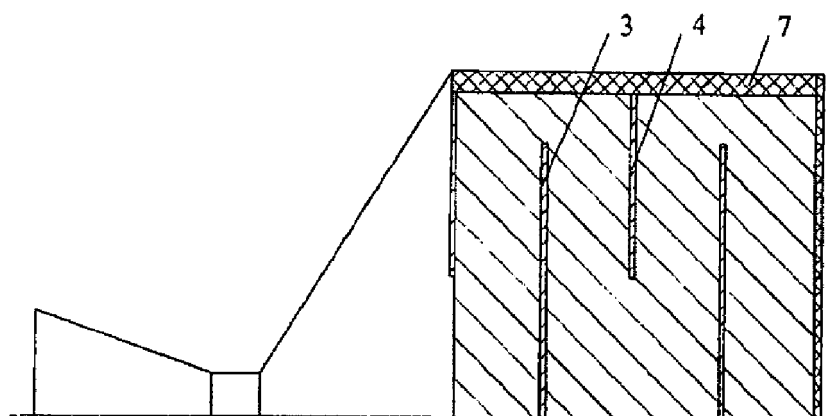


Fig. 3b

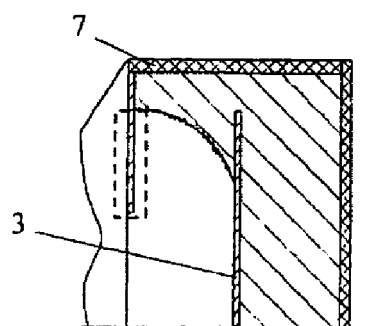


Fig. 4a

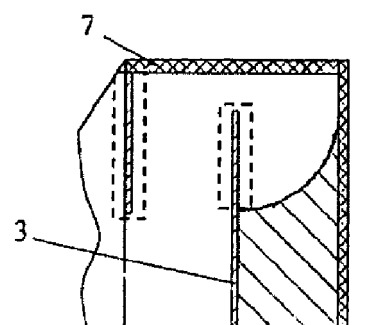


Fig. 4b