

MASZYNY ELEKTRYCZNE

część 9

NAGRZEWANIE PROMIENNIKOWE

Nagrzewanie promiennikowe jest to nagrzewanie elektryczne oparte na zjawisku promieniowania temperaturowego i luminescencyjnego emitowanego przez specjalnie do tego celu zbudowane źródła promieniowania.

Promieniowanie temperaturowe i luminescencyjne wiąże się z przemianą energii cieplnej w energię promieniowania w źródle promieniowania (inkadescencja), z jej przesyłem za pośrednictwem fal elektromagnetycznych do odbiornika, a następnie z absorpcją i przemianą w energię ciepłą w odbiorniku promieniowania.

Tej dwukrotnej konwersji energii towarzyszy jeszcze jedna, przemiana energii elektrycznej w ciepłą w źródle promieniowania. Źródło to może emitować wyłącznie promieniowanie temperaturowe, temperaturowe i luminescencyjne bądź wyłącznie luminescencyjne .

Nagrzewanie promiennikowe jest formą **nagrzewania pośredniego**. Źródłem energii jest promiennik elektryczny specjalnie wykorzystywany w celu emisji i kierowania w żądanym kierunku tego promieniowania. Jest to promieniowanie podczerwone lub z dominującym jego udziałem względnie nadfioletowe z udziałem innych zakresów widma.

PODSTAWOWE PRAWA DOTYCZĄCE NAGRZEWANIA PROMIENNIKOWEGO

Prawo Kirchhoffa stwierdza, że emisyjność całkowita powierzchni ciała (a więc zdolność do emisji promieniowania cieplnego) jest równa absorpcyjności

$$\varepsilon = A$$

Prawo to ma zastosowanie zarówno do źródeł promieniowania, jak i do nagrzewanych wsadów. Dotyczy ono ciał doskonale czarnych i szarych, a więc takich, które mają wartość $\varepsilon = \text{const}$ w całym zakresie długości fal.

W przypadku tzw. ciał barwnych, a więc promieniujących selektywnie

$$\varepsilon_{\lambda} = A_{\lambda}$$

przy czym $\varepsilon_{\lambda} = f(\lambda)$.

Prawo Plancka wyraża zależność między monochromatyczną gęstością strumienia cieplnego q_λ , w W/m^3 , długością fali promieniowania λ , w m, oraz bezwzględną temperaturą powierzchni promieniującej T , w K

$$q_\lambda = \varepsilon_\lambda \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

przy czym

$c_1 = (3,741832 \pm 0,000020) \cdot 10^{-16} W \cdot m^2$ - pierwsza stała wzoru Plancka,

$c_2 = (1,438786 \pm 0,000045) \cdot 10^{-2} m \cdot K$ - druga stała wzoru Plancka,

λ - długość fali

Prawo Wiena odnosi się do ciał czarnych i szarych. Określa ono zależność między długością fali λ_{max} , przy której q_λ osiąga wartość maksymalną $q_{\lambda max}$ i temperaturą termodynamiczną T .

$$\lambda_{max} = \frac{2,89779 \cdot 10^{-3}}{T}$$

Prawo Stefana-Boltzmann określa związek między całkowitą gęstością strumienia cieplnego emitowanego przez źródło lub wsad i temperaturą bezwzględną powierzchni promieniującej

$$q = \int_0^{\infty} \varepsilon_\lambda(\lambda) q_\lambda d\lambda$$

Prawo Lamberta, niekiedy nazywane także kierunkowym prawem Lamberta, stwierdza, że moc d^2P_{c,f_1,f_2} docierająca do powierzchni elementarnej f_2 , a wypromieniowana przez powierzchnię elementarną f_1 w kierunku tworzącym kąt ϕ_1 z normalną do f_1 równa jest iloczynowi mocy $d^2P_{c,f_1,n}$ promieniowanej w kierunku normalnej do f_1 i $\cos\phi_1$

$$d^2P_{c,f_1,f_2} = d^2P_{c,f_1,n} \cos\phi_1$$

Prawo to jest ściśle w odniesieniu do ciał czarnych (indeksy c), dobrze opisuje rozsył promieniowania cieplnego ciał o powierzchniach matowych oraz doskonale rozpraszających. Największe odstępstwa od rozsyłu lambertowskiego wykazują metale polerowane.

Prawo Lamberta-Bouguera, niekiedy nazywane prawem zanikowym Lamberta, opisuje rozkład gęstości strumienia cieplnego we wsadzie q_x w funkcji odległości od powierzchni, przez którą strumień ten wnika do wsadu

$$q_x = qe^{-ax}$$

przy czym współczynnik a wyrażony w $1/m$ jest pochłanianością materiału napromieniowanego

Promienniki elektryczne składają się z dwóch podstawowych elementów: emitującego i kierującego promieniowanie.

Element emitujący promieniowanie może mieć charakter konstrukcyjny (część promiennika) lub funkcjonalny (np. plazma łuku elektrycznego). Element funkcjonalny źródła przestaje istnieć wraz z ustaniem pracy promiennika.

Elementem kierującym promieniowanie w żądanym kierunku jest sam element emitujący promieniowanie, np. promiennik rurkowy bez odbłyśnika promieniujący do całej przestrzeni, lub odrębna część promiennika zwana odbłyśnikiem, odbijająca i kierująca promieniowanie do określonego kąta bryłowego .

Z punktu widzenia zakresu promieniowania wyróżnia się promienniki podczerwieni i nadfioletu. Promienniki podczerwieni dzielą się na 3 kategorie; długofalowe, charakteryzujące się tym, że długość fali, przy której emitowana jest największa moc $\lambda_{\max} > 4 \mu\text{m}$; średnifalowe ($2 \mu\text{m} < \lambda_{\max} \leq 4 \mu\text{m}$) i krótkofalowe ($\lambda_{\max} \leq 2 \mu\text{m}$).

W obszarze nadfioletu $0,015 \div 0,40 \mu\text{m}$ budowane są źródła emitujące promieniowanie w zakresie falowym $0,2 \div 0,4 \mu\text{m}$.

Promienniki podczerwieni dzieli się także na jasne (świejące) i ciemne (nieświejące). Przy temperaturach $\leq 430^{\circ}\text{C}$ całkowite promieniowanie emitowane jest w podczerwieni, przy czym do ciemnych zalicza się przeważnie promienniki o temperaturze $\leq 1000^{\circ}\text{C}$, ponieważ udział promieniowania widzialnego w obszarze $430\div 1000^{\circ}\text{C}$ jest jeszcze bardzo mały

PROMIENNIKI PODCZERWIENI O OTWARTYCH ŻARNIKACH METALOWYCH SKRĘTKOWYCH

Są najprostsze konstrukcyjnie. Żarniki, czyli elementy w których następuje konwersja energii elektrycznej w ciepłą, wykonuje się ze stopów rezystancyjnych. Umieszcza się je w kształtkach z otwartymi kanałami. Oba te elementy emitują promieniowanie w pożądanym kierunku, dzięki stosowanym odbłyśnikom z cienkiej blachy stalowej z naniesioną galwanicznie powłoką o dużym współczynniku odbicia w obszarze podczerwieni. Stosowane są też odbłyśniki z Al o dużej czystości, polerowane elektrolitycznie.

PROMIENNIKI PODCZERWIENI O NIEOSŁONIĘTYCH ŻARNIKACH NIEMETALOWYCH I METALOWYCH PRĘTOWYCH, RUROWYCH LUB PŁYTOWYCH

Żarnikami są elementy grzejne wykonywane ze stopów rezystancyjnych, metali wysokotopliwych i materiałów niemetalowych przeznaczonych do pracy w wysokich temperaturach ($\geq 1400^{\circ}\text{C}$). Podobnie jak w przypadku pieców i nagrzewnic rezystancyjnych są to elementy promieniujące, będące integralnymi częściami promiennikowych urządzeń grzejnych. Bardzo rzadko stanowią one jednostki autonomiczne. Źródła tej grupy stosowane są głównie w promiennikowych piecach próżniowych.

PROMIENNIKI PODCZERWIENI O ŻARNIKACH W OSŁONACH SZKLANYCH

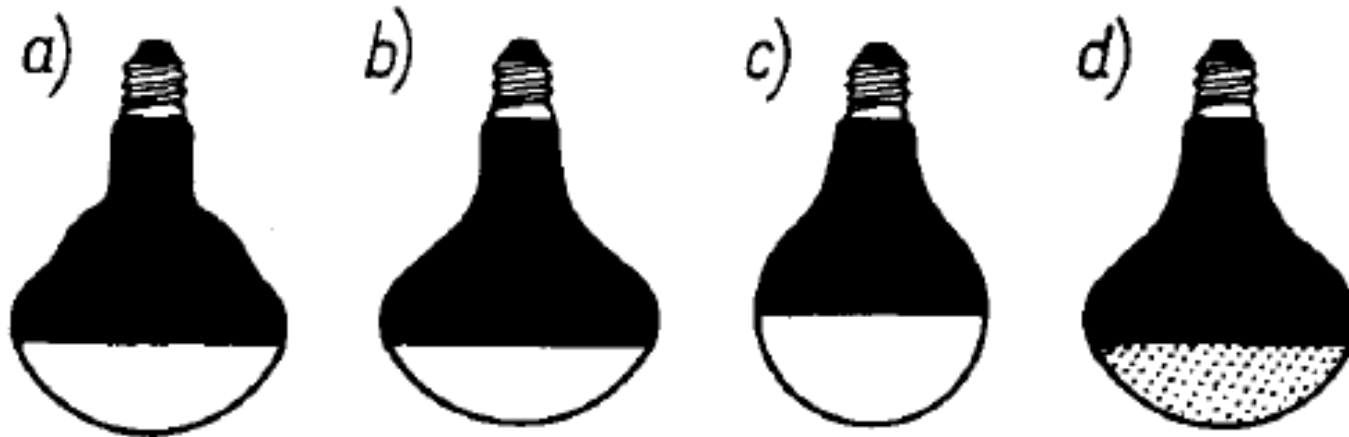
W promiennikach tych moc emitowana jest przez żarnik i nagrzaną od niego osłonę szklaną. Ciepło jest przejmowane przez osłonę wskutek pochłaniania części mocy promienistej, a także w wielu konstrukcjach w wyniku konwekcji. Stosunek mocy promienistych oddawanych przez układ żarnik - osłona bywa zróżnicowany.

Żarnik, stanowiący pierwotne źródło promieniowania, ma zazwyczaj postać skrętki wykonanej z materiałów rezystancyjnych i nie styka się z osłoną szklaną. Wewnątrz osłony jest powietrze, częściej gaz obojętny lub próżnia.

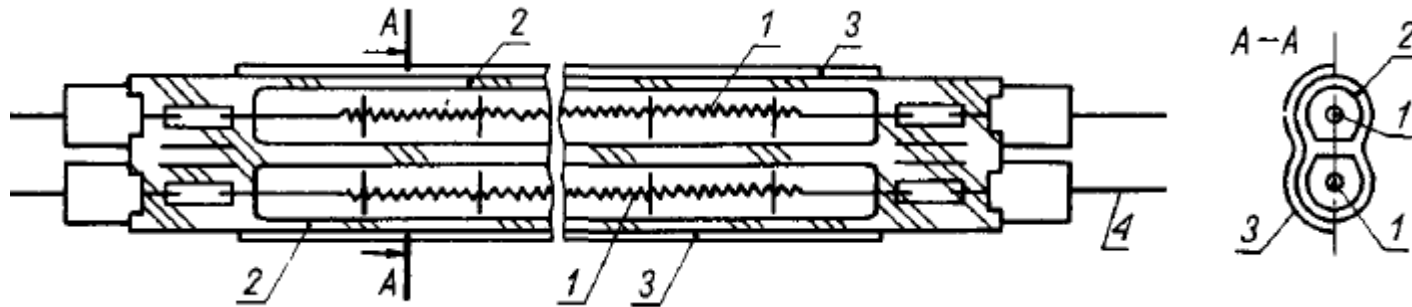
Układ żarnik - osłona może być wyposażony w odbłyśnik wewnętrzny lub zewnętrzny, tworząc promiennik lub tzw. segment promiennikowy, czyli także promiennik o konstrukcji umożliwiającej zestawianie różnej wielkości i kształtu urządzeń grzejnych

Kształty współczesnych promienników lampowych z odbłyśnikami wewnętrznymi:

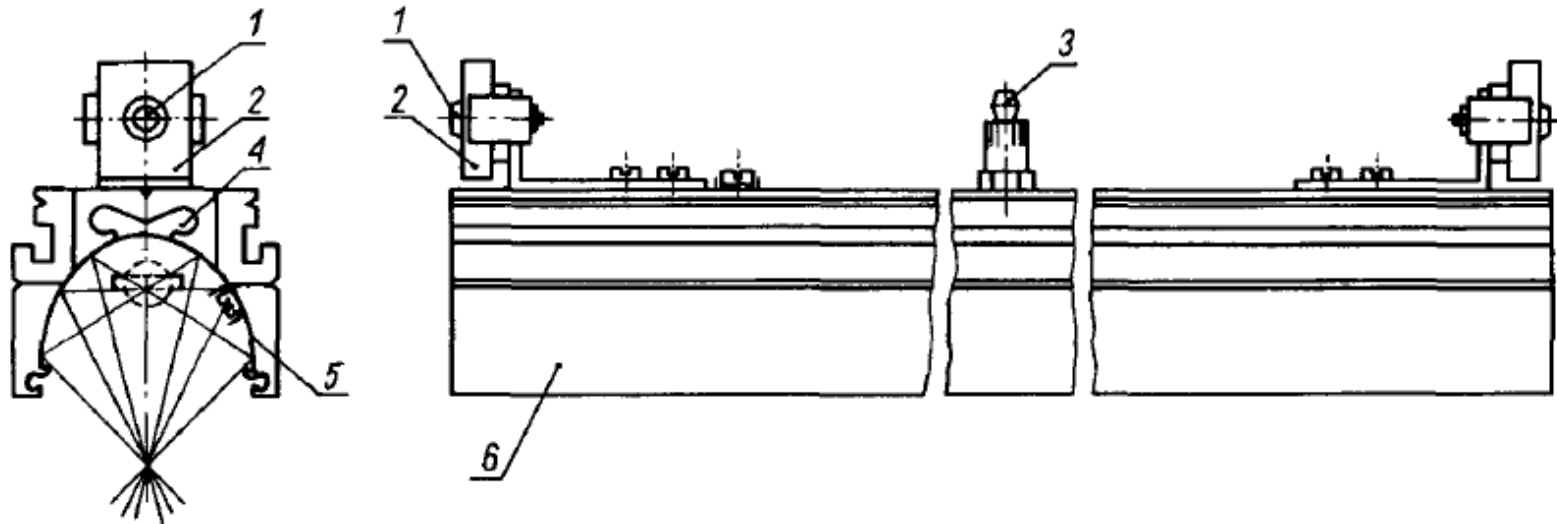
- a) dwuparaboloidalnym,
- b) paraboloidalnym,
- c) kulistym,
- d) paraboloidalnym z bańką rubinową



Odbłyśniki wewnętrzne wykonuje się z naporowywanych w próżni Al, Ag i Au.

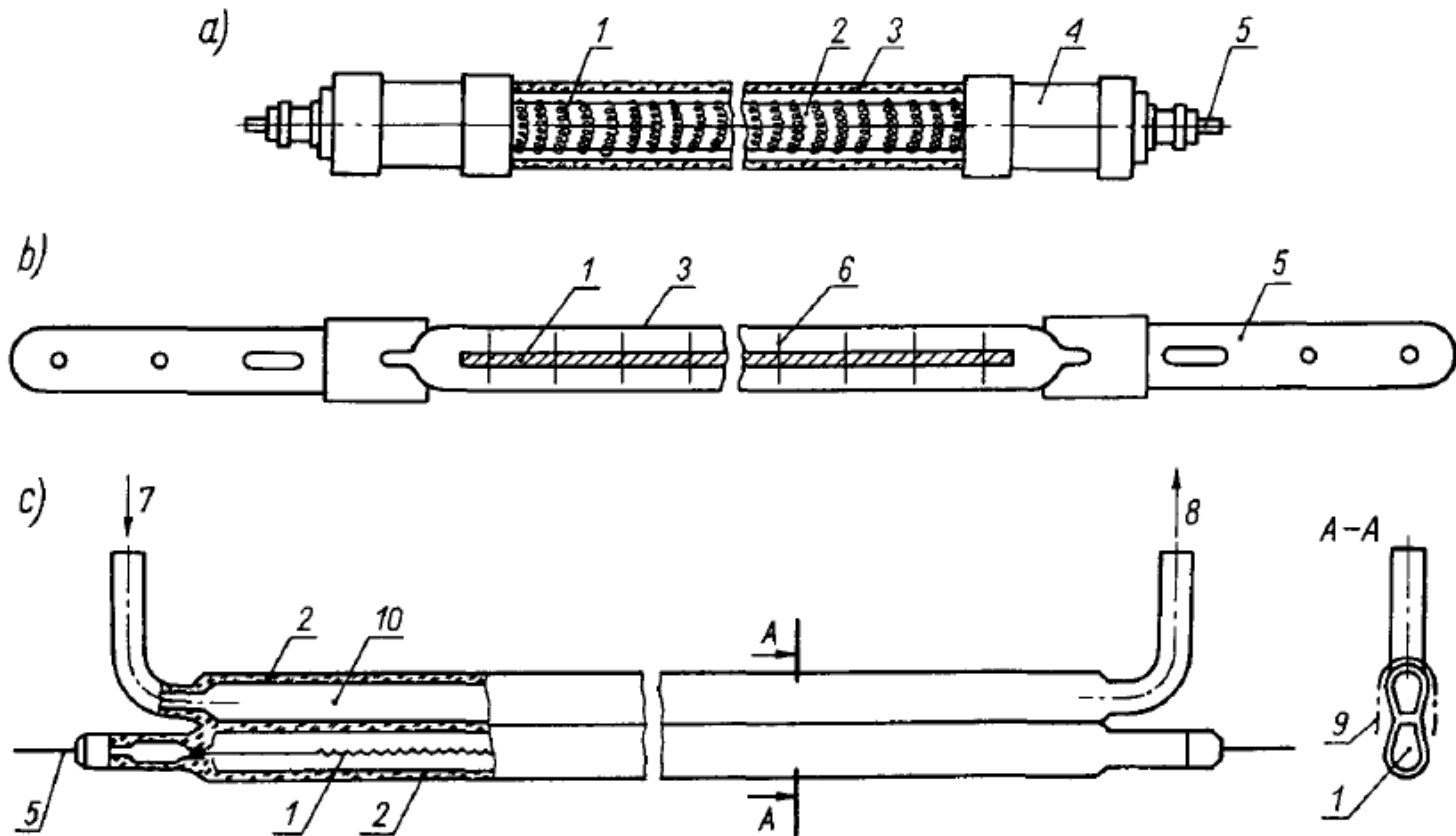


Promiennik podwójny z rurkami kwarcowymi z połączonym odbłyśnikiem zewnętrznym
 1 - żarnik, 2 - podwójna rurka kwarcowa, 3 - odbłyśnik, 4 - doprowadzenie prądowe



Segment promiennikowy przystosowany do promiennika typu b)

1 - zacisk doprowadnika prądowego, 2 - izolacja elektryczna, 3 - doprowadzenie powietrza chłodzącego, 4 - kanał chłodzenia, 5 - odbłyśnik eliptyczny z połączonej folii stalowej, 6 - aluminiowy korpus



Przykłady promienników liniowych o żarnikach w rurowych osłonach szklanych:

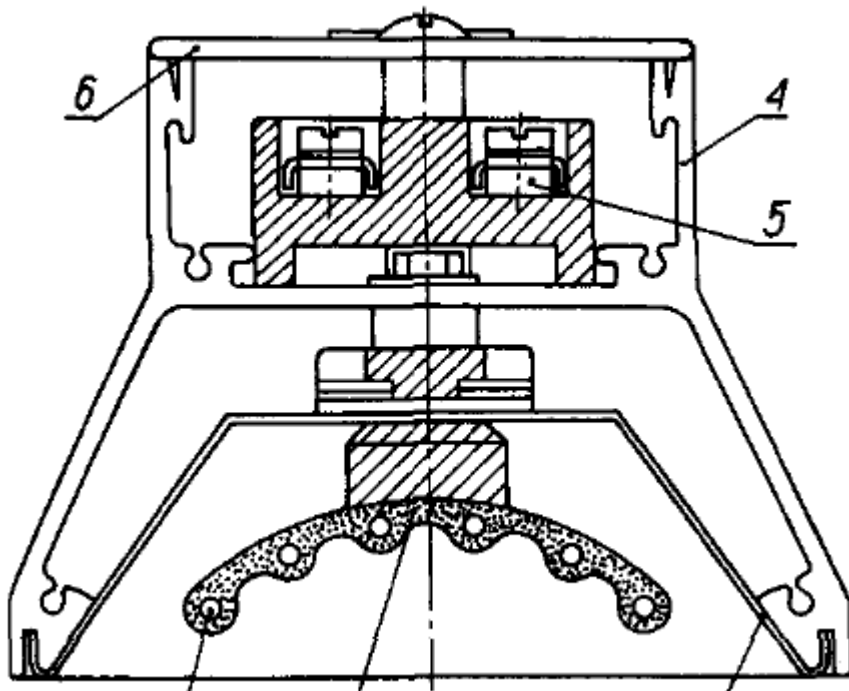
a) kwarcowy z żarnikiem ze stopu rezystancyjnego; b) kwarcowy z żarnikiem wolframowym;
 c) kwarcowy z rurką podwójną oraz z żarnikiem wolframowym i chłodzeniem wodnym (przy ich użyciu uzyskuje się napromienienia wsadu rzędu 400 kW/m^2)

1 - żarnik, 2 - pręt kwarcowy, 3 - rurka kwarcowa, 4 - trzonek, 5 - doprowadnik prądowy,
 6 - pierścień dystansowy, 7 - doprowadzenie wody chłodzącej, 8 - wylot wody chłodzącej,
 9 - połączony odbłyśnik zewnętrzny, 10 - rurka kwarcowa z wodą chłodzącą

PROMIENNIKI PODCZERWIENI O CERAMICZNYCH ORAZ METALOWYCH PŁASZCZACH PROMIENIUJĄCYCH

Żarniki tych promienników są umieszczone lub zaprasowane w ceramice. Masa ta, nagrzewana przez przewodzenie, emituje promieniowanie bezpośrednio lub oddaje ciepło do promieniującego płaszcza metalowego względnie ceramicznego. Przy stosowaniu płaszczy metalowych (stal żaroodporna, chromowa lub chromoniklowa), elementy promieniujące są wykonywane w kształcie rurek (promienniki rurkowe) o przekroju okrągłym, owalnym, a niekiedy także prostokątnym. Średnice rurek, lub największe wymiary przekroju poprzecznego, zawierają się w granicach 6÷30 mm, długości sięgają 4 m.

Promienniki o ceramicznych płaszcach promieniujących (punktowe, liniowe i płaszczyznowe) są wyposażone w żarniki ze stopów rezystancyjnych. Temperatura powierzchni promieniującej zawiera się w granicach 400÷750°C, a tylko niekiedy przekracza 1000°C. Promienniki punktowe wyposaża się w znormalizowane trzonki E27 lub E40. Promienniki liniowe (o mocach jednostkowych 20÷30 W/cm) są krótsze i o większych średnicach aniżeli rurowe szklane, płaszczyznowe zaś mają kształty kołowe lub prostokątne ukształtowane w sposób ułatwiający kierowanie strumienia promienistego w żądanym kierunku



Przekrój segmentu z powierzchniowym promiennikiem ceramicznym

- 1 - żarnik,
- 2 - masa ceramiczna,
- 3 - odbłyśnik,
- 4 - obudowa,
- 5 - zacisk przyłączeniowy,
- 6 - pokrywa

ŁUKOWE LAMPY WYŁADOWCZE

Działanie tych źródeł polega na wykorzystaniu promieniowania gazów i par metali zawartych w szklanych bańkach podczas wyładowania elektrycznego oraz towarzyszącego mu promieniowania nagrzewanych elektrod i bańki.

Promieniowanie tych źródeł znamienne jest występowaniem szeregu mniej lub bardziej ostrych maksimumów, charakterystycznych dla wzbudzonych atomów gazu lub pary, w których zachodzi wyładowanie.

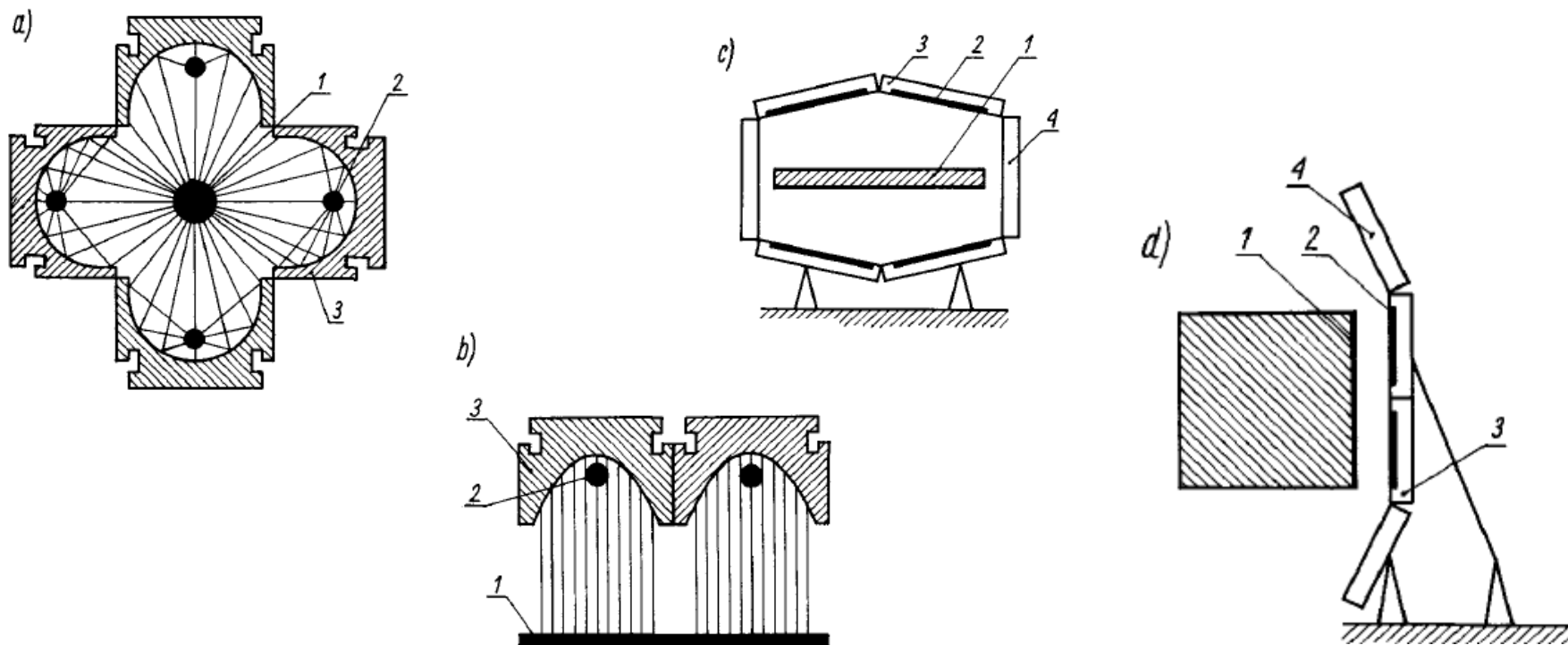
Moce niektórych lamp dochodzą do 30 kW (wysokoprężne wypełnione ksenonem). W urządzeniach promiennikowych znalazły zastosowanie głównie ksenonowe lampy łukowe (produkcja super czystych materiałów, topienie strefowe, wyciąganie kryształów)

W zakresie nadfioletu używa się w przeważającej mierze wysokociśnieniowych lamp rtęciowych, lamp bezelektrodowych i ksenonowych

URZĄDZENIA PROMIENNIKOWE ATMOSFEROWE

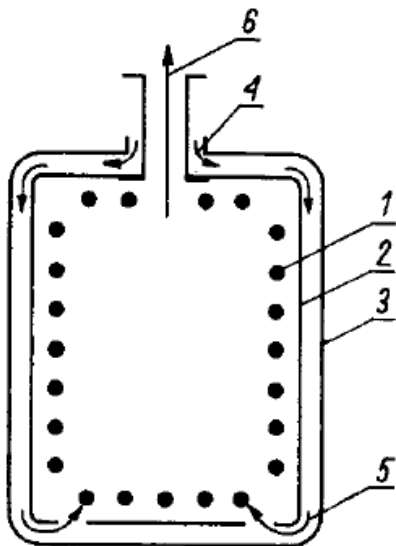
Są to urządzenia, których człony grzejne są wyposażone w promienniki elektryczne, przekazujące energię ośrodkom (wsadom) w atmosferze naturalnej bądź sztucznej wyłącznie lub głównie za pośrednictwem promieniowania elektromagnetycznego.

Pod względem konstrukcyjnym urządzenia promiennikowe atmosferyczne mają kilka cech szczególnych, różniących je od rezystancyjnych. Przede wszystkim ściany wewnętrzne pieców są wykonane z metali o dużym współczynniku odbicia



Przykłady urządzeń promiennikowych atmosferycznych:

- a) piec promiennikowy z segmentów z odbłyśnikami eliptycznymi;
 - b) nagrzewnica z segmentów z odbłyśnikami parabolicznymi;
 - c) piec z segmentami promiennikowymi i odbłyśnikowymi;
 - d) nagrzewnica z segmentami promiennikowymi i odbłyśnikowymi
- 1 - wsad, 2 - element promieniujący, 3 - korpus segmentu z odbłyśnikiem,
 4 - segment bezpromiennikowy z odbłyśnikiem



- Piec promiennikowy z wymuszonym obiegiem atmosfery
- 1 - promiennik rurkowy bez odbłyśnika,
 - 2 - ściana odbłyśkowa,
 - 3 - ściana zewnętrzna,
 - 4 - wlot i powierza,
 - 5 - wlot powietrza do komory,
 - 6 - wylot atmosfery

Obróbka cieplna metali to obszar zastosowań głównie nagrzewnic i pieców z promiennikami rurowymi, kwarcowymi i halogenowymi. Ich użycie umożliwia nagrzewanie wsadów stalowych w powietrzu lub w atmosferze gazów ochronnych do temperatur rzędu 1400°C . Nagrzewanie w gazach ochronnych wymaga umieszczenia wsadu w rurze kwarcowej. Spośród zastosowań z zakresu obróbki cieplnej metali należy wymienić:

- nagrzewanie przed hartowaniem, odpuszczanie, utwardzanie dyspersyjne, wyżarzanie;
- nagrzewanie drutów i taśm w celu ich gięcia, tłoczenia, zgrzewania, uplastyczniania;
- lutowanie lutami twardymi.

Obróbka cieplna niemetalu to głównie obróbka tworzyw sztucznych. Nagrzewa się je w celu zwiększenia ich plastyczności koniecznej do walcowania i wytłaczania, przed formowaniem próżniowym, przy pokrywaniu kabli i przewodów elektrycznych izolacją. Inne zastosowania to: topienie tworzyw, uplastycznianie klejów i materiałów wiążących, utwardzanie żywic epoksydowych, poliestrów i innych tworzyw sztucznych, wytwarzanie laminatów warstwowych, wulkanizowanie i wypalanie tworzyw, hermetyczne zatapianie

Suszenie jest jednym z najbardziej spektakularnych zastosowań urządzeń promiennikowych ze źródłami podczerwieni i nadfioletu. Obecnie wyodrębnia się trzy główne grupy zastosowań: suszenie powłok (lakierów, farb, emalii, klejów itp.), płatów (tkanin, papieru, skóry itp.) oraz drobnic (materiałów sproszkowanych, ziaren itp.) Powłoki są trwale połączone z podłożem i wobec tego nagrzewanie promiennikowe w procesie suszenia obejmuje powłokę i jej podłoże. Parametry podłoża, a zwłaszcza współczynnik odbicia, dyfuzyjność oraz grubość, wpływają pośrednio na rozkład temperatury w powłoce. Skrócenie czasu suszenia o 50÷95% w porównaniu z techniką konwekcyjną uzyskuje się przy obróbce tzw. powłok przemiennych (lakierów piecowych), których schnięcie polega nie tylko na odparowywaniu rozpuszczalnika, lecz przede wszystkim na utlenianiu i polimeryzacji

Metodę promiennikową można stosować przy suszeniu powłok na różnych podłożach pod warunkiem, że nie ulegnie zmianom ich struktura. Najczęściej suszy się lakiery na podłożach metalowych. Szczególne znaczenie technika ta znalazła w przemyśle samochodowym, zarówno przy ich produkcji, jak i naprawie.

Ważnym zastosowaniem jest suszenie farb drukarskich. Przy wzroście szybkości druku, zwłaszcza wielobarwnego, szybkie suszenie staje się rozstrzygającym elementem w procesie produkcyjnym. Korzystne rezultaty uzyskuje się przy suszeniu druku offsetowego, fleksograficznego i wklęsłego.

Bardzo pozytywne rezultaty uzyskuje się przy suszeniu powłok na podłożu drewnianym w przemyśle meblarskim. Wynika to z łatwości regulacji temperatury (m.in. ogranicza się ryzyko przegrzania podłoża), z małego zużycia energii, krótkiego czasu rozgrzewu.

Do utwardzania powłok, a zwłaszcza farb drukarskich wprowadza się coraz częściej urządzenia z promiennikami ultrafioletowymi. Poddaje się obróbce powłoki o składzie czułym na promieniowanie UV powodujące szybką polimeryzację. Proces ten może być skrócony do rzędu 1 s. Większość tego typu farb i lakierów nie zawiera w ogóle rozpuszczalników

Ogrzewanie promiennikowe polega na wykorzystaniu bezpośredniego fizjologicznego działania grzejjego promieniowania podczerwonego na organizmy żywe. Węzłowym zagadnieniem staje się więc nie tyle ogrzewanie pomieszczenia, ile konieczność zapewnienia jego użytkownikowi tzw. komfortu cieplnego.

Ogrzewanie promiennikowe jest formą korygowania warunków klimatycznych zarówno w pomieszczeniach zamkniętych, jak i otwartych. Metoda ta jest stosowana przy użyciu ogrzewaczy stałych oraz mobilnych.

Ogrzewanie promiennikowe charakteryzuje się bardzo małą bezwładnością cieplną i jest szczególnie przydatne do ogrzewania pomieszczeń zamkniętych eksploatowanych doraźnie oraz obszarów otwartych (trybuny stadionów, leżalnie sanatoryjne, tarasy, place budowy).

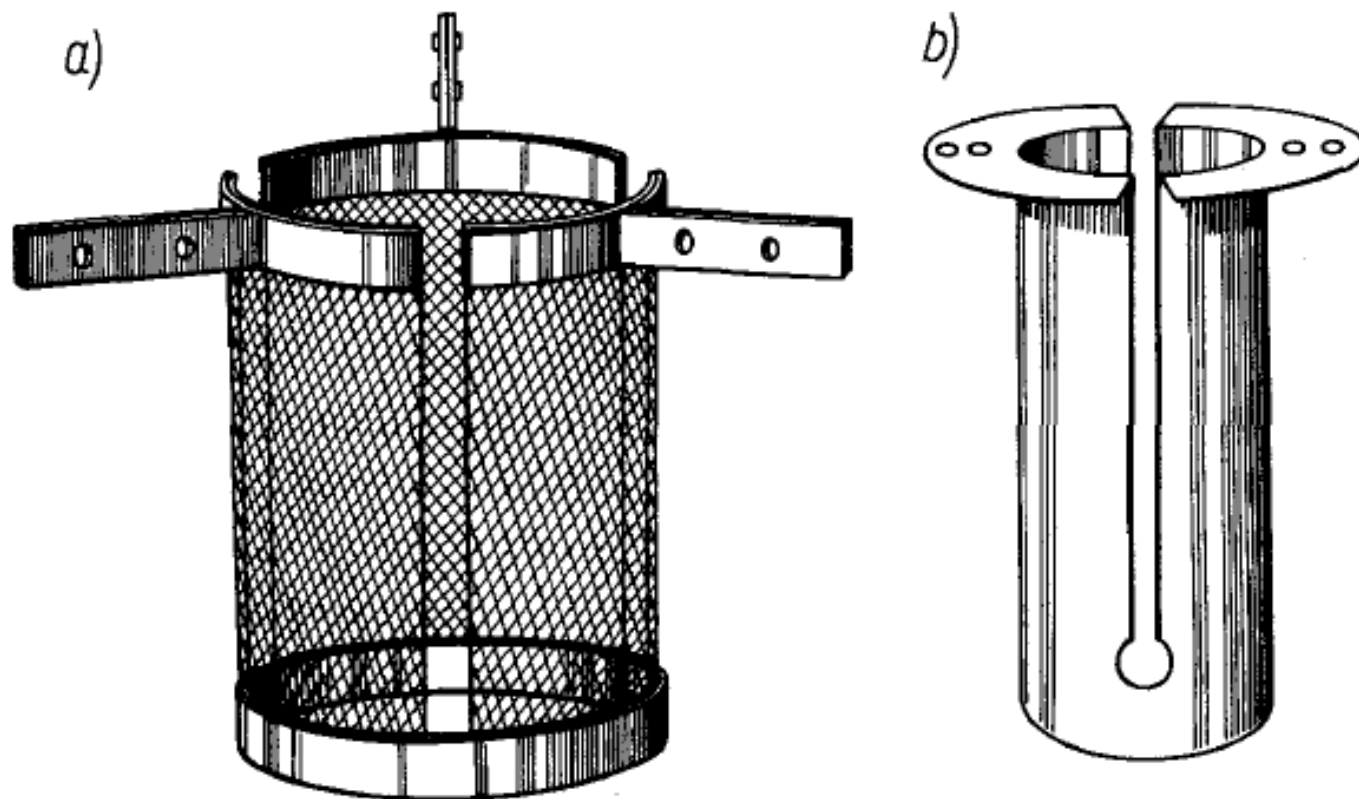
Wykorzystuje się je także do rozmrażania ładunków masowych (węgiel, ruda) transportowanych w odkrytych wagonach metalowych. Do tego celu używa się nagrzewnic tunelowych o mocy kilku MW. Dzięki dobrej przewodności cieplnej stali, po krótkim ogrzaniu skrzyni wagonu, przymarznięty do niej ładunek daje się bez trudu usunąć na wywrotnicy wagonów.

URZĄDZENIA PROMIENNIKOWE PRÓŻNIOWE

Są to urządzenia z elektrycznym piecem próżniowym jako członem podstawowym, w którym energia do wsadu umieszczonego w próżni technicznej dopływa wyłącznie lub głównie za pośrednictwem promieniowania temperaturowego.

W skład urządzenia promiennikowego próżniowego, oprócz członu podstawowego (pieca), wchodzi zawsze człon próżniowy. Jest to pompa lub zespół pomp z wyposażeniem, mający za zadanie usunąć z komory próżniowej gazy i pary w jak najkrótszym czasie i utrzymywać żadaną próżnię w czasie procesu technologicznego. Większość próżniowych pieców promiennikowych wyposażonych jest w układy chłodzenia różnych elementów składowych takich jak zbiornik próżniowy, uszczelki, wszelkiego rodzaju przepusty. Człony chłodzenia należą do bardziej złożonych podzespołów promiennikowego urządzenia próżniowego.

Większość urządzeń ma człon lub człony napędowe. Stosowane są napędy elektryczne, hydrauliczne, pneumatyczne. Używa się ich m.in. do transportu wsadu zarówno w piecach przelotowych, jak i nieprzelotowych; do uruchamiania pokryw piecowych, wewnętrznych przegród i śluz oraz jako elementów wyposażeniowych innych członów składowych urządzenia.



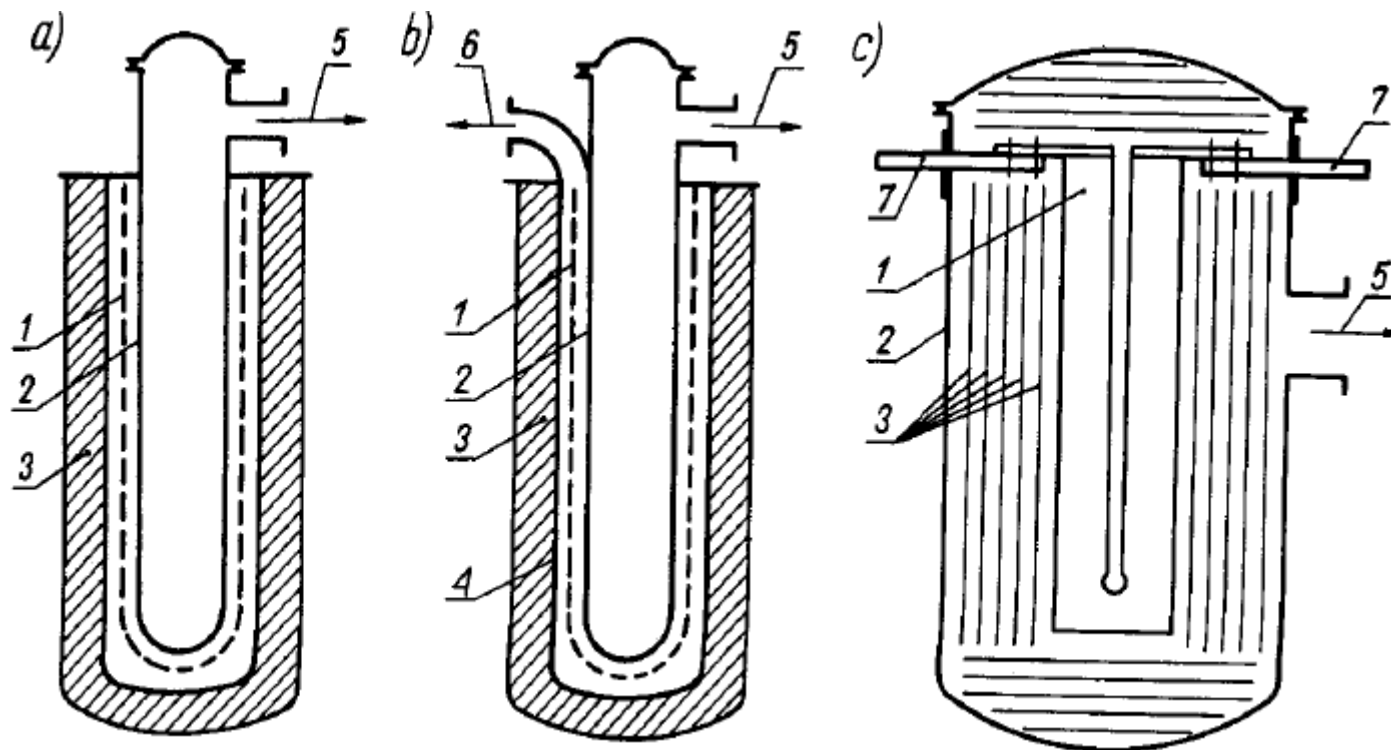
Źródła ciepła z metali wysokotopliwych stosowane w promiennikowych piecach próżniowych:

- a) trójfazowe typu koszowego;
- b) b) jednofazowe typu rurowego

Człon zasilania elektrycznego w wielu typach urządzeń, zwłaszcza do obróbki cieplnej, umożliwia dopasowanie napięcia zasilającego do charakterystyk elektrycznych źródeł ciepła oraz realizację programowej regulacji temperatury.

Bezpośrednie zasilanie elektrycznych źródeł ciepła z sieci jest regułą w przypadku pieców nisko i średniotemperaturowych o naturalnych temperaturowych charakterystykach roboczych.

Pozostałe piece, a zwłaszcza wysokotemperaturowe, ze źródłami z materiałów o zmieniającej się rezystywności (z wolframu, molibdenu, grafitu) wyposaża się w zasilanie o regulowanym napięciu.



Schematy promiennikowych pieców próżniowych:

- a) z gorącą komorą próżniową i źródłem ciepła w obszarze o ciśnieniu atmosferycznym;
- b) z gorącą komorą próżniową i źródłem ciepła w obszarze o obniżonym ciśnieniu;
- c) z zimną komorą próżniową i elementem grzejnym w obszarze o ciśnieniu roboczym

1 - źródło ciepła, 2 - komora próżniowa, 3 - izolacja cieplna, 4 - zbiornik próżniowy,
 5 - do układu pompowego, 6 - do układu pompowego (próżnia pośrednia),
 7 - doprowadzenia prądowe

Piece z gorącą komorą (b) mają izolację cieplną poza obszarem próżni między komorą próżniową i obudową pieca. Elektryczne źródła ciepła umieszczone są po zewnętrznej stronie komory, a w pewnych rozwiązaniach sama komora stanowi źródło. Takie rozwiązanie ma wiele zalet i umożliwia korzystanie z klasycznych układów grzejnych oraz termoizolacyjnych. Jego wadą zasadniczą jest ograniczenie temperaturowego zakresu pracy z uwagi na niebezpieczeństwo implozji komory próżniowej, której temperatura podczas nagrzewania jest wyższa od temperatury wsadu.

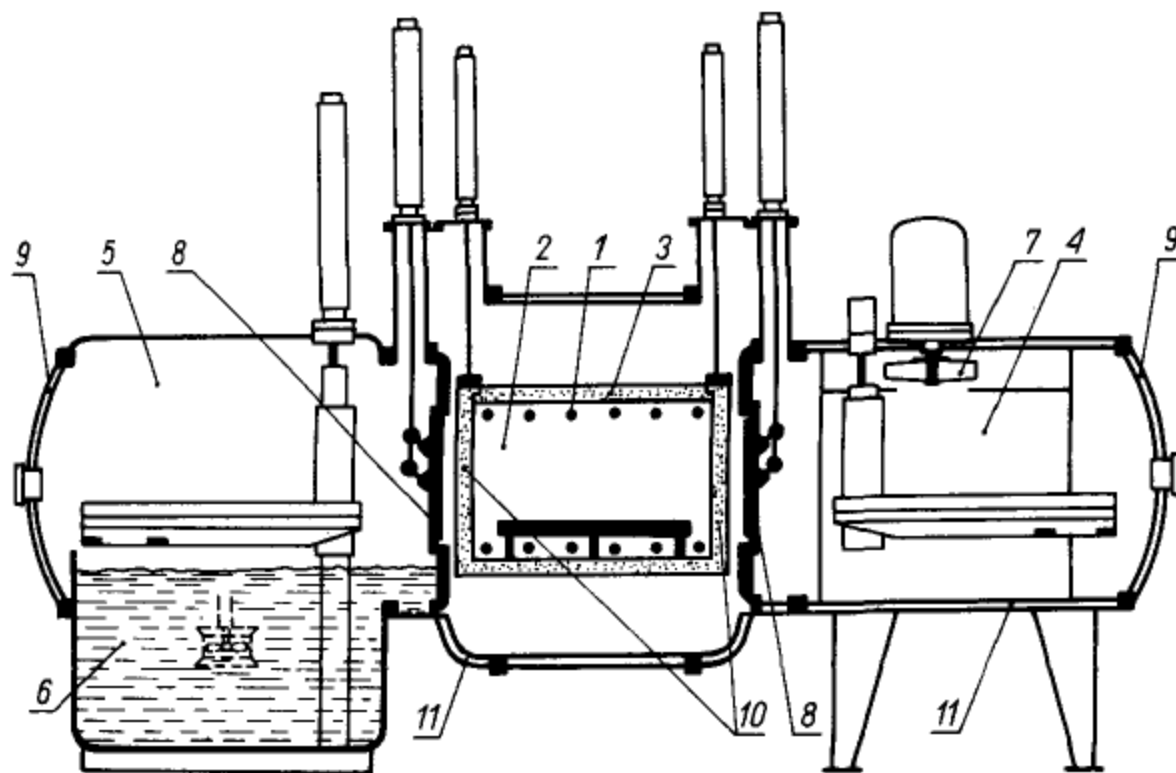
Piece z zimną komorą (c) nie mają tej wady, ponieważ źródła ciepła znajdują się w próżni i są oddzielone od komory próżniowej - stanowiącej zarazem zewnętrzną obudowę pieca - izolacją cieplną umieszczoną także w próżni. Komora znajduje się więc poza obszarem wysokiej temperatury i bywa często dodatkowo chłodzona wodą. Takie rozwiązanie ogranicza lub uniemożliwia stosowanie izolacji klasycznej, a w większości konstrukcji także elementów grzejnych tego rodzaju jakich używa się w budowie pieców rezystancyjnych.

Zalety nagrzewania w promiennikowych urządzeniach próżniowych są związane z realizowanymi technologiami. Można jednak wyodrębnić kilka, które mają charakter uniwersalny. Przejawia się on w:

- a) ochronie wsadu przed utlenianiem;
- b) eliminacji, względnie silnym ograniczeniu oddziaływania innych składników atmosferycznych (np. pary wodnej) na wsad;
- c) możliwości uzyskania ekstremalnie wysokich temperatur;
- d) mniejszej energochłonności w porównaniu z procesami substytucyjnymi;
- e) wysokim stopniu bezpieczeństwa pracy przy urządzeniach;
- f) całkowitej eliminacji zanieczyszczania środowiska;
- g) istotnym ograniczeniu bądź eliminacji cieplnego obciążenia środowiska.

Szczególnymi zaletami obróbki cieplnej metali w próżni są:

- a) eliminacja operacji czyszczenia powierzchni wsadów po obróbce;
- b) zmniejszenie pracołłonności obróbek wykańczających przez zmniejszenie nad datków materiałowych;
- c) odgazowanie warstwy przypowierzchniowej wsadu, a tym samym polepszenie jego charakterystyk mechanicznych



Promiennikowy piec próżniowy trójkomorowy do obróbki cieplnej
1 - źródła ciepła, 2 - komora grzejna, 3 - izolacja cieplna, 4 - komora chłodzenia gazowego
wsadu, 5 - komora chłodzenia olejowego wsadu, 6 - wanna z olejem,
7 - wentylator wymuszający ruch gazu w komorze, 8 - śluzą próznioszczelną,
9 - pokrywa pieca, 10 - zasuwa komory grzejnej, 11 - woda chłodząca

Suszenie próżniowe charakteryzuje się znacznym obniżeniem temperatury wrzenia czynników odparowywanych co sprawia, że wrażliwe lub ulegające łatwemu rozpadowi materiały mogą być wysuszone w próżni znacznie łatwiej aniżeli przy ciśnieniu atmosferycznym.

Regułą jest, z uwagi na większą szybkość parowania, skrócenie czasu suszenia. Często towarzyszące suszeniu odgazowanie materiału ma również istotne znaczenie. Przy nagrzewaniu impulsowym korzystniejsze efekty energetyczne uzyskuje się w procesach suszenia materiałów drobnoporowatych. Dotyczy to w szczególności materiałów ceramicznych.

Korzyści z suszenia impulsowego, realizowanego zarówno w układach nieprzelotowych jak i przelotowych (suszarki ze strefami czynnymi wyposażonymi w promienniki i ze strefami biernymi bez promienników), wynikają ze zgodności kierunków gradientów temperatury i wilgotności.

W przerwach między napromienieniem wsadu ciepło głębiej wnika we wsad, a obszary bardziej odległe od powierzchni nagrzewają się do wyższej temperatury aniżeli ona sama.

NAGRZEWANIE ELEKTRODOWE

Nagrzewanie elektrodowe jest to nagrzewanie elektryczne oparte na wydzielaniu ciepła przy przepływie prądu elektrycznego przez ośrodek ciekły połączony ze źródłem energii za pośrednictwem elektrod.

Jeżeli temperatury są wyższe od temperatury otoczenia lub gdy ośrodki grzejne w stanie stałym są złymi przewodnikami prądu, niezbędne jest wstępne ich rozgrzanie do temperatury przewodzenia inną metodą grzejną. Najczęściej spotykanymi ośrodkami grzejnymi są: woda, sole, szkło, elektrolity, roztwory wodne, żużle.

Celem nagrzewania elektrodowego jest bezpośrednio dostarczenie energii do ośrodka ciekłego lub za jego pośrednictwem do umieszczonych w nim ciał (substancji), nie wykluczając elektrod. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z **nagrzewaniem bezpośrednim**, w drugim z **pośrednim**

Nagrzewanie elektrodowe w zależności od technologii - realizuje się w sposób ciągły, okresowy lub przerywany .

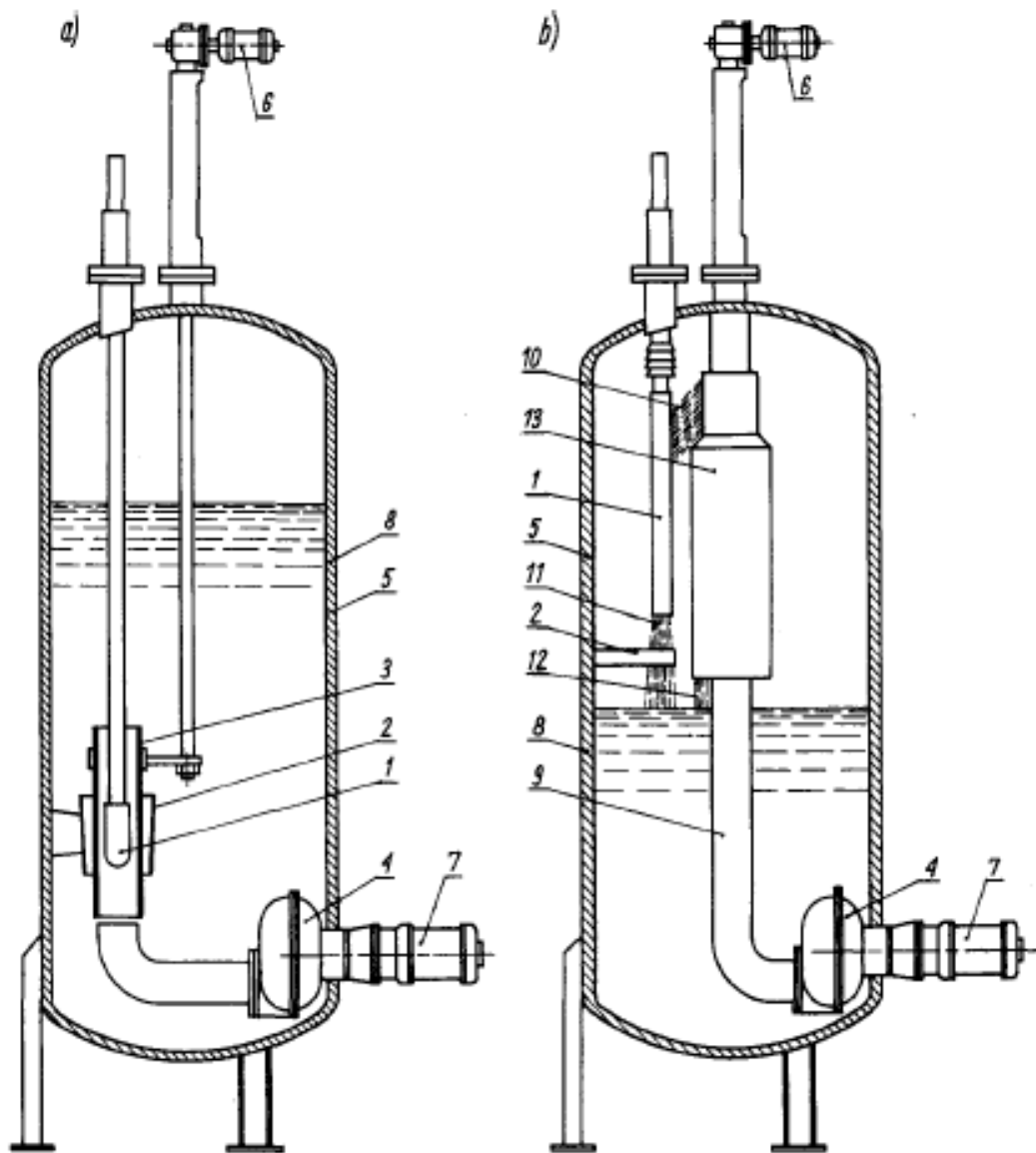
Elektrody są elementami pośredniczącymi w przekazywaniu energii elektrycznej do ciekłego ośrodka grzejnego i stykają się z nim bezpośrednio. Styk może mieć charakter konstrukcyjny lub funkcjonalny. Styk konstrukcyjny realizowany jest przez częściowe, a niekiedy całkowite zetknięcie elektrody z ośrodkiem ciekłym, utrzymanym w zbiorniku. Styk funkcjonalny istnieje tylko wówczas, gdy przepływający ośrodek ciekły zamyka obwód prądowy

URZĄDZENIA DO NAGRZEWANIA WODY

Nagrzewanie elektrodowe wody, a także wytwarzanie pary wodnej realizowane jest prądem przemiennym w urządzeniach nieprzelotowych i przelotowych.

Zasada nagrzewania polega na bezpośrednim przepływie prądu przez wodę, której rezystywność zależy nie tylko od temperatury, lecz także od ilości i rodzajów rozpuszczonych w niej substancji. Konwersja energii elektrycznej w ciepło odbywa się w trakcie przepływu prądu elektrycznego między elektrodami stanowiącymi wyposażenie głównych członów urządzeń, a mianowicie kotłów i nagrzewnic przelotowych. Mają na nią wpływ parametry wody, geometria układu elektrodowego, a w szczególności wymiary czynnej powierzchni elektrod.

Obciążenie jednostkowe powierzchni czynnej elektrod zależy głównie od materiału, z którego są one wykonane, od ich konstrukcji, a także od jakości wody. Kotły stosuje się do nagrzewania wody i do wytwarzania pary. Ich moce dochodzą do 70 MW. Kotły duże o mocach 4÷70 MW są zasilane bezpośrednio z sieci o napięciu 6÷30 kV, podobnie kotły średnie o mocach 1÷4 MW zasilane są z sieci o napięciu 1÷3 kV zaś małe kotły o mocach 15÷1000 kW napięciem niskim



Kotły elektrodowe:

- a) kocioł o mocy regulowanej
położeniem rury izolacyjnej
umieszczonej między elektrodą i
przeciwelektrodą;
- b) kocioł wytryskowy

- 1 - elektroda,
- 2 - przeciwelektrodą,
- 3 - rura izolacyjna,
- 4 - pompa,
- 5 - zbiornik,
- 6 - silnik z układem napędowym
- 7 - silnik pompy,
- 8 - termoizolacja,
- 9 - rura,
- 10 - górny strumień wody,
- 11 - dolny strumień wody,
- 12 - nadmiar wody,
- 13 - obudowa rury

W normalnych warunkach eksploatacyjnych kotły trójfazowe są odbiornikami symetrycznymi. Asymetria może powstać np. wskutek nierównomiernego parowania wody w sąsiedztwie elektrod.

Uziemienie kotła elektrodowego zasilanego z sieci trójfazowej o nieuziemionym punkcie zerowym, może być przyczyną zbyt dużych prądów podczas ewentualnych zwarć. Zapobiec temu można włączając uziemiony kocioł do sieci za pośrednictwem transformatora obniżającego lub separacyjnego względnie izolując kocioł od ziemi. To drugie rozwiązanie wymaga m.in. elektrycznej separacji kotła od zewnętrznego układu hydraulicznego i jest z dobrym skutkiem stosowane w kotłach na-wet o największych mocach

Kotły buduje się w formie pionowo ustawionych cylindrycznych zbiorników. Są one napełnione wodą całkowicie lub częściowo, przy czym kotły parowe - zawsze częściowo.

Prąd doprowadzany jest do elektrod przez przepusty wbudowane w metalowe ściany kotła. Elektrody mają różne kształty i wykonywane są z węgla lub metali (żelaza, brązu, miedzi).

Woda w kotle wytryskowym tłoczona jest pompą 4 z dolnej części zbiornika do pionowego przewodu rurowego 9. W górnej części przewodu umieszczone są otwory, przez które woda 10 wytryskuje w kierunku elektrody I o kształcie rynny. Wypływająca z tych przewodów woda spada na perforowaną metalową przeciwelektrodę 2 połączoną ze zbiornikiem i dalej przelewa się do dolnej części zbiornika. Nadmiar wody 12 sływa koncentryczną szczeliną między przewodem rurowym 9 i jego obudową 13. Metalowy przewód rurowy i przeciwelektroda są elektrycznie połączone ze ścianami zbiornika i mają potencjał zerowy. Przepływ prądu odbywa się więc równolegle przez dwa strumienie wodne: górny 10 i dolny 11, powodując intensywne parowanie wody.

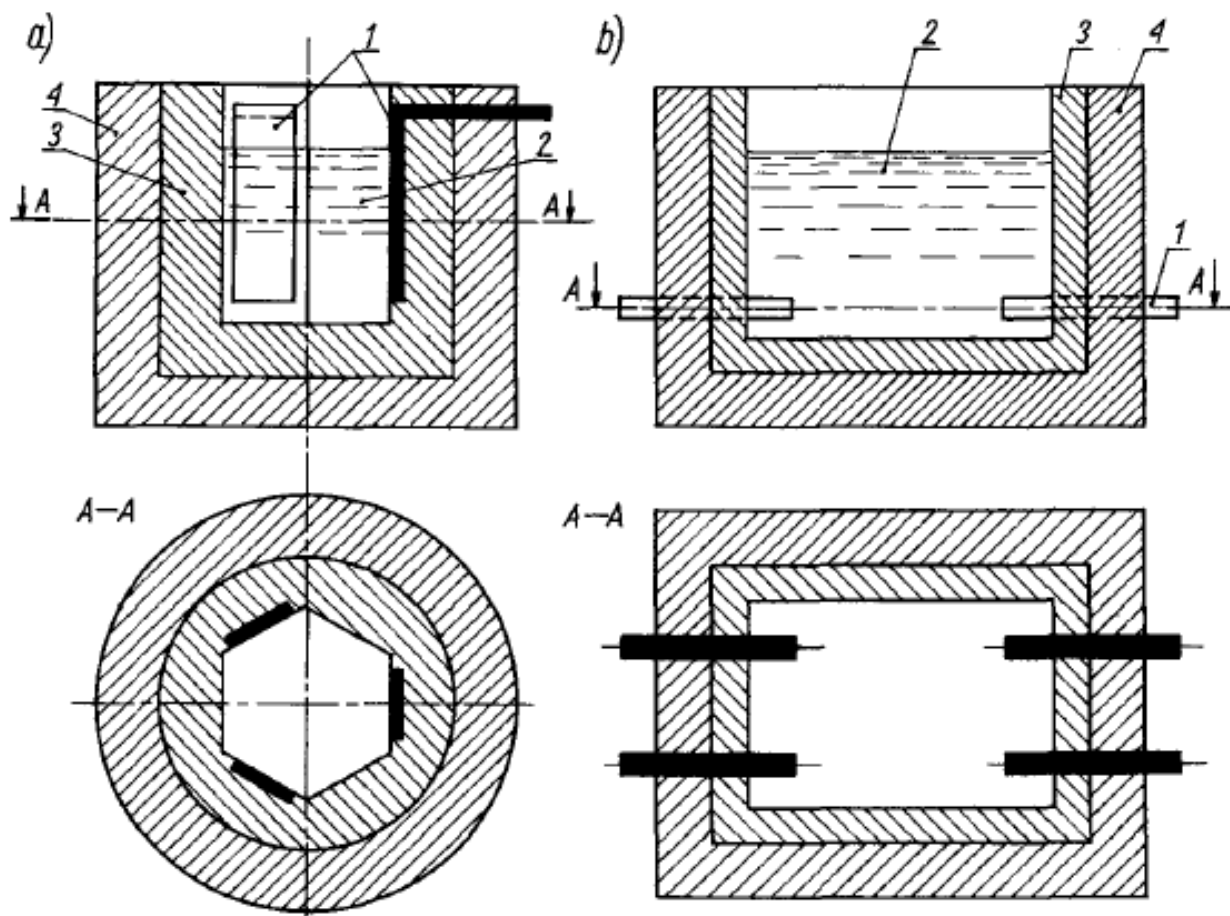
Kotły wytryskowe budowane zwykle na wysokie napięcia mają bardzo dużą wydajność.

URZĄDZENIA DO OBRÓBKII CIEPLNEJ METALI

Obróbkę cieplną metali, a ściśle rzecz biorąc obróbkę półwyrobów metalowych można realizować metodą elektrodową w roztopionych solach. Jako mediów przewodzących używa się soli tych metali, które w stanie ciekłym mają wymagane właściwości elektryczne. Szczególnie nadają się do tego celu sole metali alkalicznych. Obróbka cieplna w takich ośrodkach jest procesem opartym na nagrzewaniu pośrednim umieszczonych w nich wsadów, a także studzeniu wsadów w soli roztopionej. Wsady są dobrymi przewodnikami prądu i w wielu rozwiązaniach trudno umknąć bezpośredniego przepływu prądu przez zanurzone w soli detale (z wyjątkiem bezprądowych stanów pracy przy chłodzeniu wsadów w soli).

Zasilanie wanien realizuje się prądem przemiennym, z wyjątkiem gdy jest ono połączone z elektrolitycznym rozkładem soli (np. w technologii borowania). Wówczas zasila się wanny napięciem zawierającym także składową stałą.

Nagrzewanie ma dwojaki cel: podwyższenie temperatury wsadu i dalszą jego obróbkę cieplną w urządzeniu lub poza urządzeniem elektrodowym bądź obróbkę dyfuzyjną w soli aktywnie chemicznej.

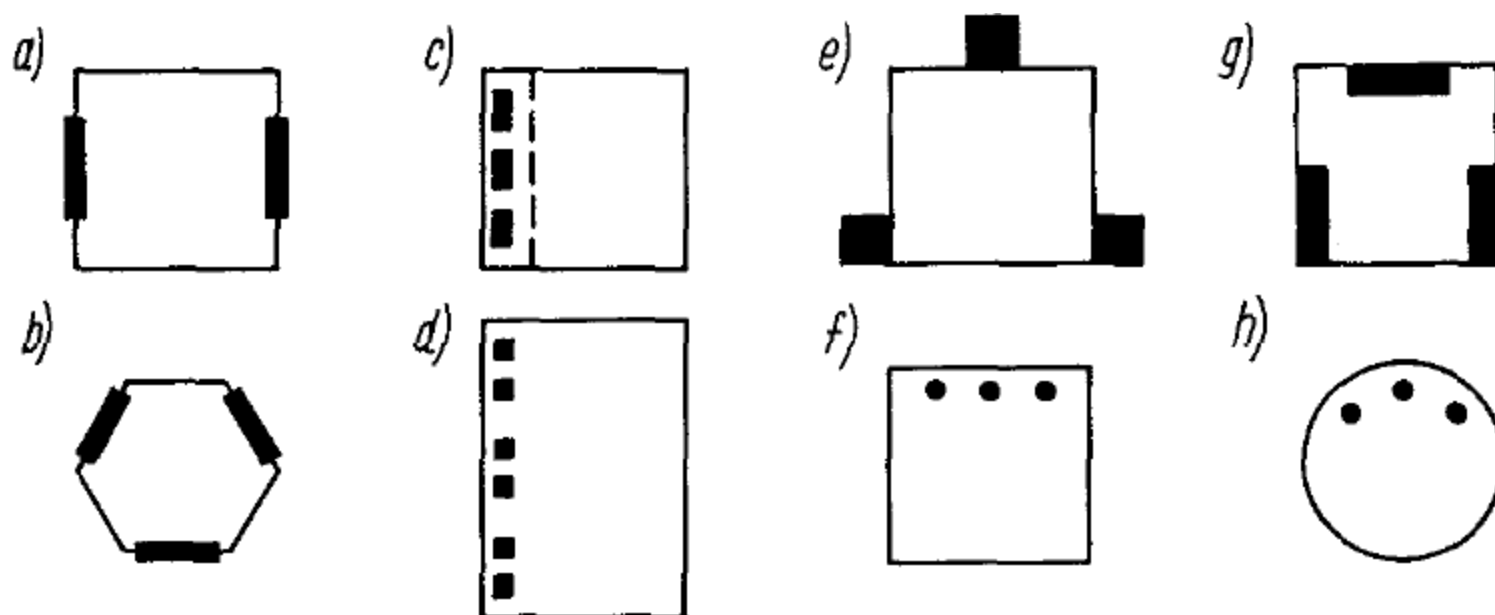


Wanny solne:

a) trójfazowe z wpuszczonymi w wyprawę elektrodami;

b) jednofazowa czteroelektrodowa z elektrodami prętowymi suwliwymi (w miarę zużywania się są przesuwane w głąb wanny)

1 - elektrody, 2 - kąpiel solna, 3 - wyprawa ogniotrwała, 4 - izolacja cieplna



Układy elektrod w wannach solnych:

- a) jednofazowy dwuelektrodowy z niewyodrębnioną przestrzenią grzejną;
- b) ,e), g) trójfazowy trójelektrodowy z niewyodrębnioną przestrzenią grzejną;
- c) trójfazowy trójelektrodowy z wyodrębnioną przestrzenią grzejną, oddzieloną od przestrzeni elektrodowej perforowaną przegrodą;
- d) trójfazowy sześcielektrodowy z wyodrębnioną przestrzenią grzejną;
- e) f), h) trójfazowy trójelektrodowy z wyodrębnioną przestrzenią grzejną

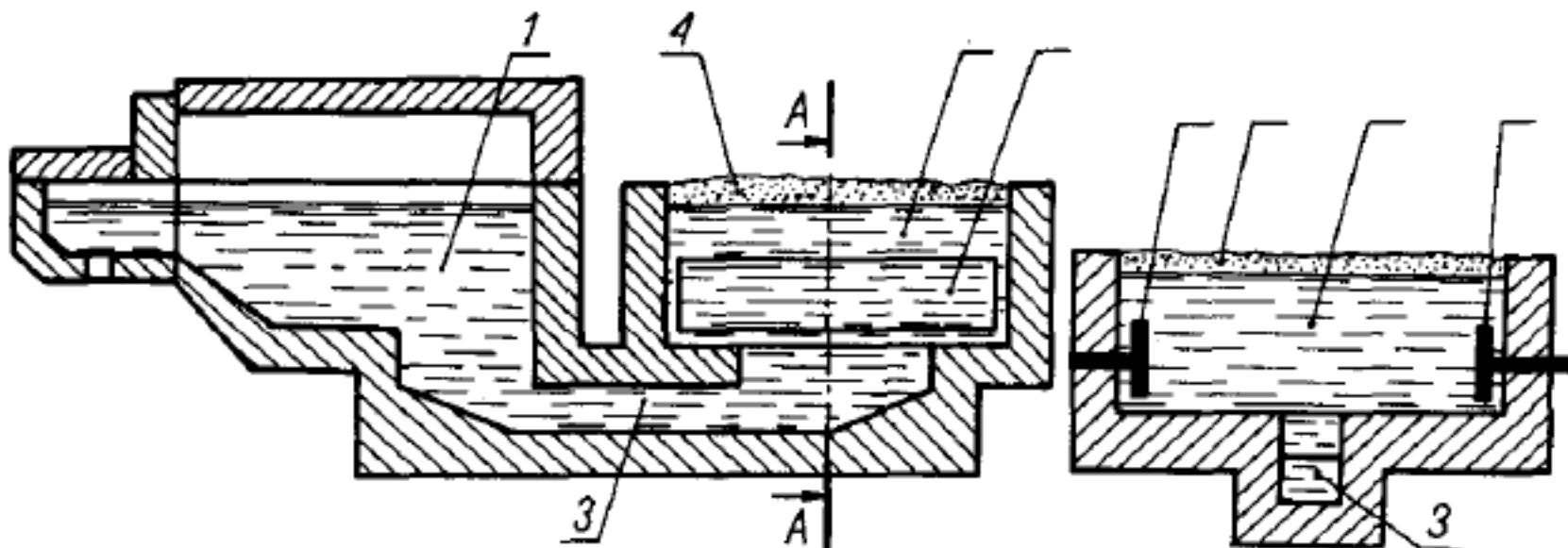
URZĄDZENIA DO TOPIENIA SZKŁA

Głównymi członami urządzenia elektrodowego do topienia szkła są:

- a) piec czyli człon grzejny wraz z układem elektrod;
- b) człon zasilania elektrod;
- c) układy pomiarowo - kontrolne;
- d) układ automatycznej stabilizacji parametrów pracy pieca
- e) układ załadowniczy.

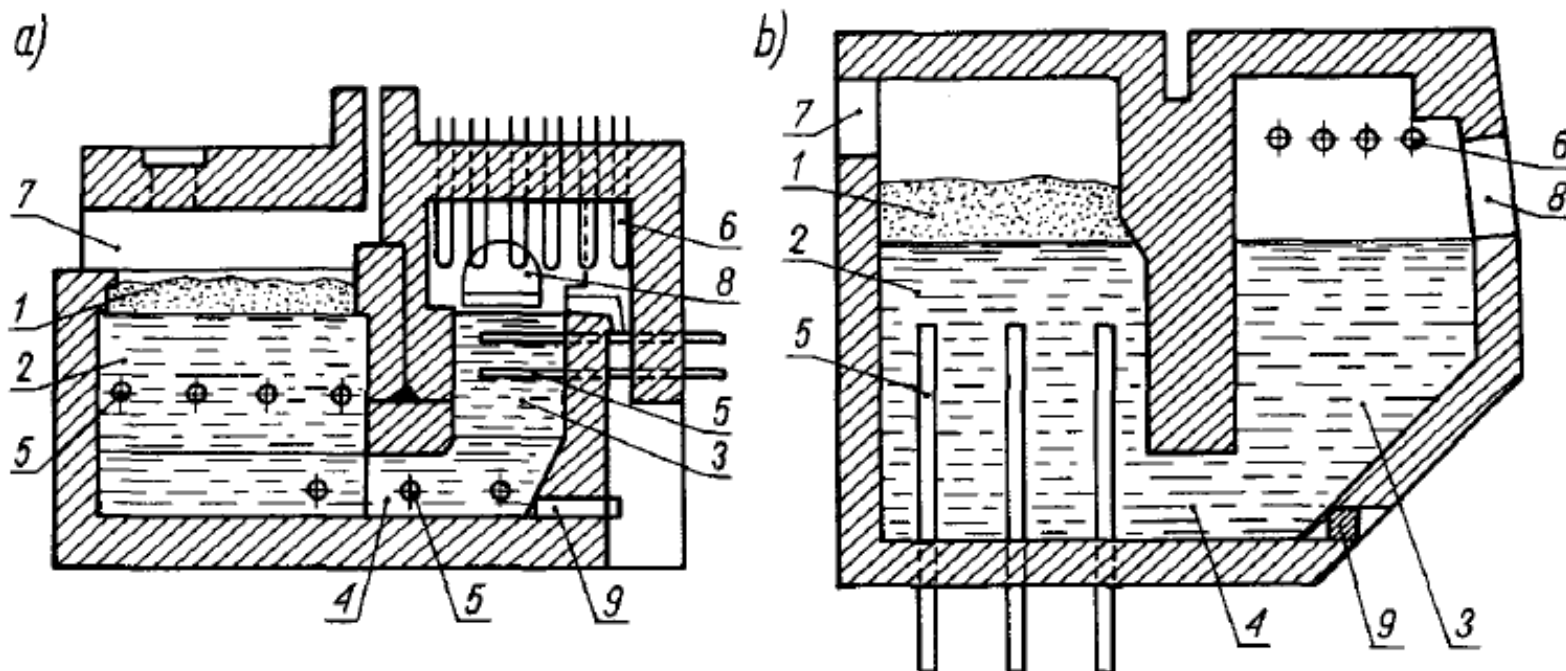
Piec elektrodowy ma kształt przystosowany do utrzymywania roztopionej masy. Jest to rodzaj basenu o mniej lub bardziej wyodrębnionych częściach topliwej i wyrębowej ze sklepieniem przykrywającym część lub cały basen.

Ściany basenu i dna wykonuje się prawie wyłącznie z topionej ceramiki ogniotrwałej (niekiedy na bazie Al^2O^2 , ZrO^2 , SiO^2 typu ER, jargal, KLB, korvesit, bakor, novokor)



Piec elektrodowy do topienia szkła typu Gella

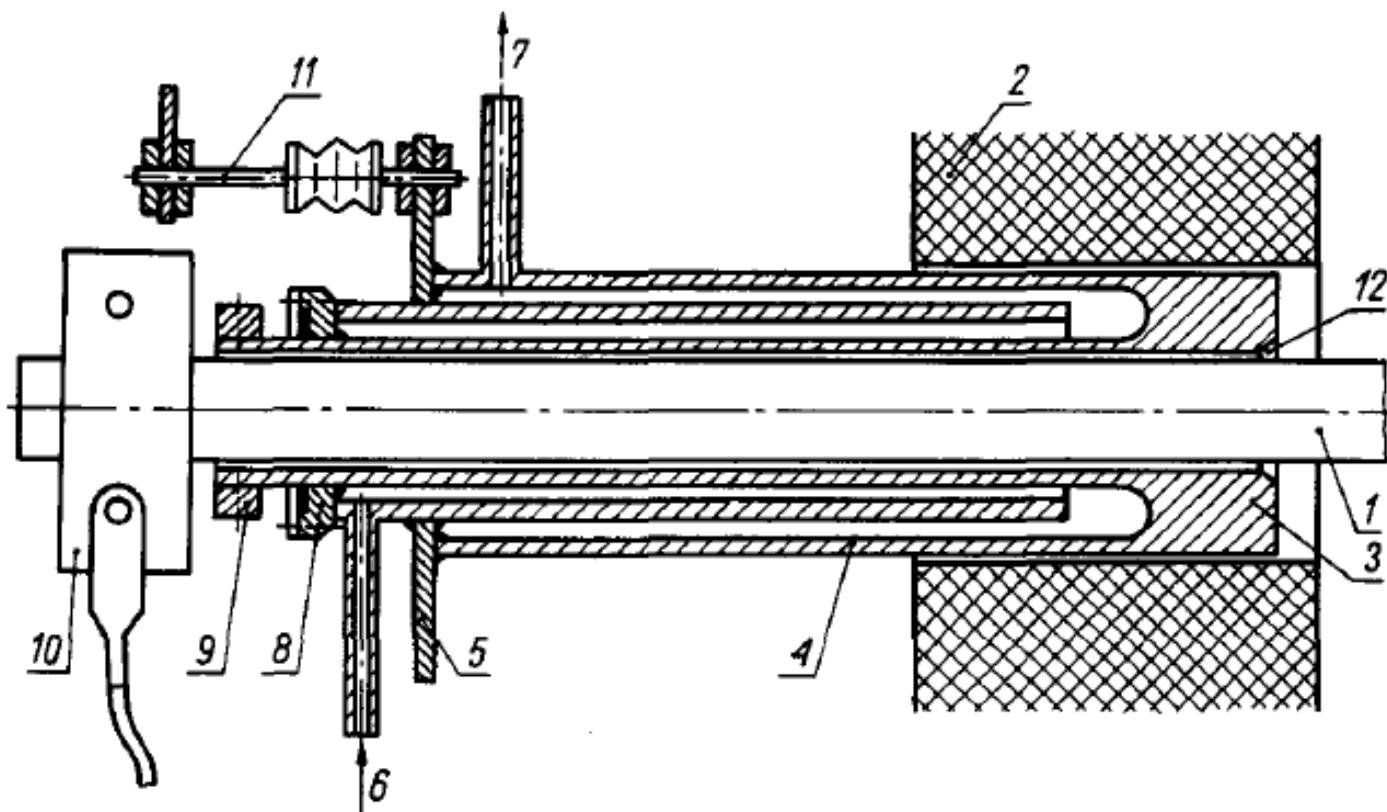
- 1 - część wyrębowa,
- 2 - część topliwna,
- 3 - przepływ,
- 4 - zestaw,
- 5 - elektroda płytowa z molibdenu



Elektrody w piecu szklarskim

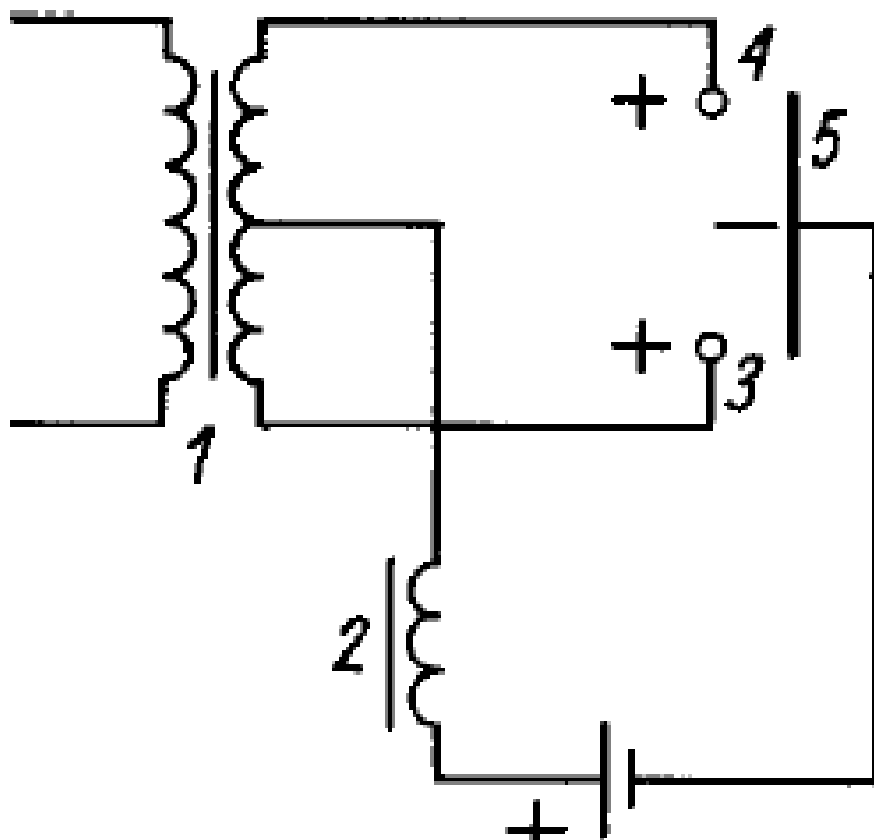
- a) umieszczone w ścianach bocznych;
- b) umieszczone w dnie

1 - zestaw, 2 - część topliwna, 3 - część wyrębowa, 4 - przepływ, 5 - elektrody, 6 - elementy grzejne rezystancyjne, 7 - okno wsadowe, 8 - okno do poboru masy, 9 – spust



Sposób wprowadzenia elektrody molibdenowej do pieca

1 - elektroda, 2 - ściana wanny, 3 - głowica uchwyty elektrody, 4 - trzpień uchwyty elektrody
 5 - kołnierz uchwyty, 6 - doprowadzenie wody chłodzącej,
 7 - odprowadzenie wody chłodząca 8 - dławnica, 9 - pierścień centrujący elektrodę,
 10 - szczęka zaciskowa z przewodem zasilającym, 11 - mocowanie uchwyty za pośrednictwem izolatora, 12 - szczelina, w którą wnika z wanny uszczelniająca masa szklana



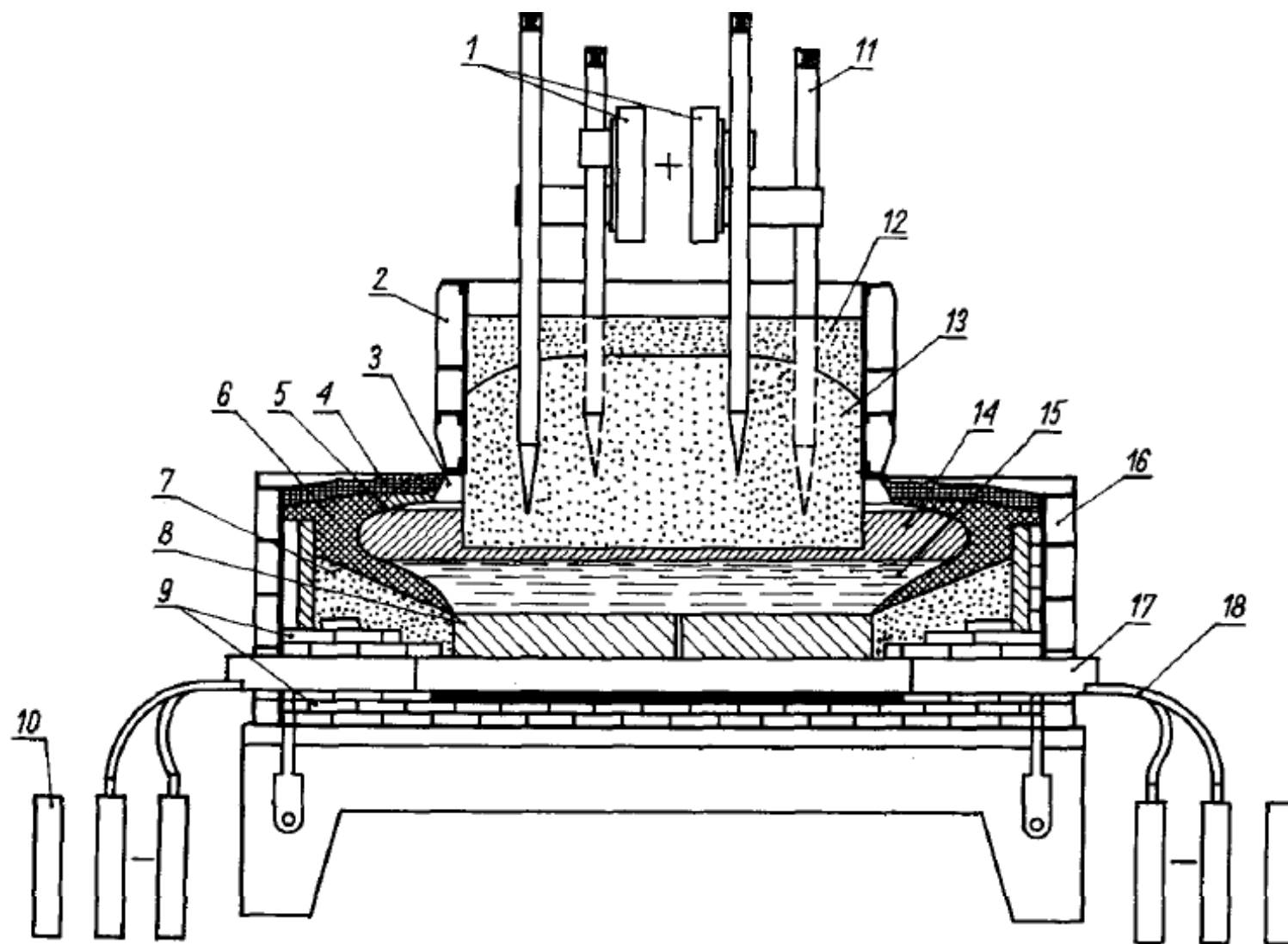
Przykład układu polaryzacji elektrod
1 – transformator piecowy,
2 – dławik ograniczający przepływ
prądu zmiennego,
3, 4- elektrody piecowe spolaryzowane
dodatnio,
5 – elektroda spolaryzowana ujemnie
(np. ściany basenu)

Poprawna eksploatacja pieca szklarskiego wyposażonego w elektrody wymaga rozbudowanego układu pomiarowego. Powinno się mierzyć w sposób ciągły prąd każdej elektrody, w tym także ochronnej, napięcie pomiędzy elektrodami

URZĄDZENIA DO WYTWARZANIA METALI NIEŻELAZNYCH

Do kategorii tej zaliczają się termoelektrolizery do wytwarzania głównie Al, Mg, Na i Ca, a ponadto Be, Li, Ce, Nb, Th, Ti, U, Zr, Ta i in.

Teromoelektrolizery są to urządzenia, w których wymienione pierwiastki otrzymuje się drogą elektrolizy w roztopionych solach stanowiących elektrolit. Procesy takie, nazywane termo-elektrolizą, podlegają tym samym prawom co elektroliza roztworów wodnych. Różnica polega na prowadzeniu procesów w wysokich temperaturach i zużyciu części energii elektrycznej na nagrzanie i utrzymywanie elektrolitu w stanie ciekłym, Energia niezbędna do tego celu jest z reguły większa aniżeli potrzebna do rozkładu chemicznego i może być uzyskana także metodą paliwową.



Przekrój poprzeczny termoelektrolizera z anodą Söderberga

1 – szyny anodowe, 2 – płaszcz anody, 3 – dzwon do zbierania gazów, 4 – tlenek glinu, 5 – skorupa na powierzchni elektrolitu, 6 – garnisaż (zakrzepłe składniki zawartości wanny stanowiące naturalną termoizolację), 7 – warstwa masy węglowej dennej, 8 – węglowe bloki denne, 9 – cegły termo-izolacyjne, 10 – szyny katodowe, 11 – sworzeń anodowy, 12 – nie-
spieczona masa anodowa, 13 – spieczona masa anodowa, 14 - elektrolit,
15 – ciekłe aluminium, 16 – stalowy płaszcz katody, 17 – rdzeń katodowy,
18 – giętkie przewody aluminiowe

Urządzenie, w którym realizowany jest proces wytwarzania Al składa się z termoelektrolizera stanowiącego jego człon grzejny, układu zasilania, układów pomiarowych i sterujących, układu do gaszenia efektów anodowych, urządzeń do załamywania skorupy wsadu na powierzchni elektrolitu i dozowania tlenku glinowego, soli fluorowych, masy anodowej, sworzni anodowych, urządzeń do pod wieszania bloku anody, odciągów gazów, filtrów suchych lub elektrofiltrów do oczyszczania gazów anodowych, kadzi zlewczych i szeregu innych urządzeń pomocniczych. Główny człon urządzenia czyli termoelektrolizer ma kształt wanny, a jego podstawowymi częściami są: katoda, anoda i oszynowanie. Ciekłe aluminium gromadzi się na dnie misy stanowiącej katodę. Pozostałą przestrzeń wypełnia elektrolit, w którym zanurzona jest stopa anody. Proces elektrolizy przebiega w warstwie elektrolitu między stopą anody, a powierzchnią ciekłego Al

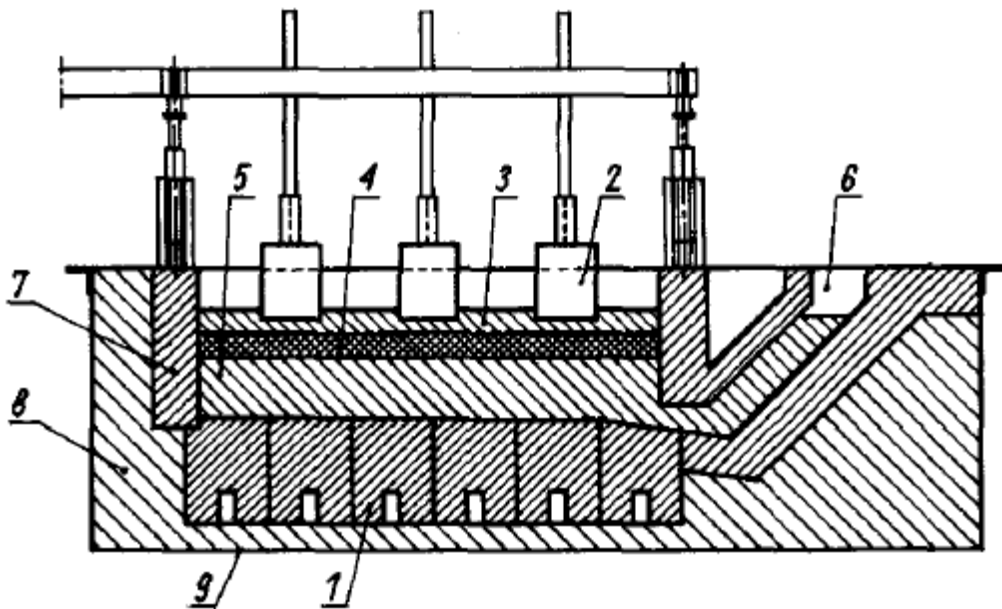
Za najkorzystniejszą, z punktu widzenia technologicznego i energetycznego, uważa się pracę ze stałym natężeniem prądu.

Wymaga to jednak rozwiązań umożliwiających regulację napięcia w dość szerokich granicach. Z tego względu stosuje się także układy pracujące ze stałą mocą serii lub rozwiązania pośrednie.

Układy najlepiej nadające się do pracy ze stałym natężeniem prądu oparte są na tyrystorowych zespołach prostownikowych. Tyrystorowy zespół prostownikowy pod względem budowy jest zbliżony do zespołu diodowego i zawiera następujące najistotniejsze elementy: łącznik wysoko lub średnionapięciowy, transformator prostownikowy, prostownik, układy sterujące, zabezpieczające i regulacyjne, aparaty obwodu stałoprądowego, filtr wyższych harmonicznym i układ kompensacji mocy biernej.

W porównaniu z zespołem diodowym nie ma potrzeby stosowania transformatora regulacyjnego oraz dławika regulacyjnego.

Termoelektrolityczna rafinacja aluminium jest procesem umożliwiającym oczyszczenie Al wytwarzanego w termoelektrolizerach redukcyjnych i zawierających m.in. następujące domieszki: Fe, Si, Ti, Na, Cu, Al_2O_3 , Al_4C_3 . Rafinację prowadzi się w podobnych urządzeniach do używanych w elektrolizie Al_2O_3 , lecz o odwróconym układzie elektrod

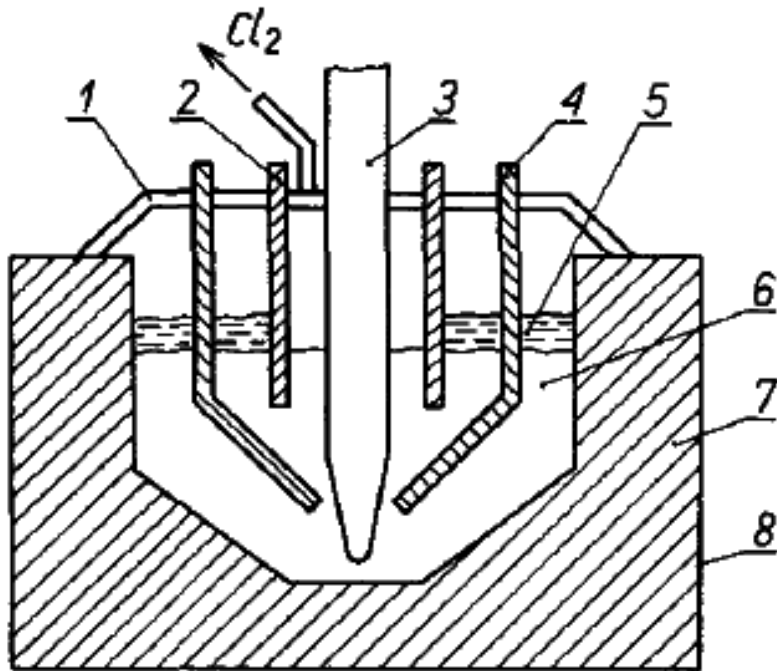


Przekrój podłużny termoelektrolizera do rafinacji aluminium

- 1 – węglowe dno wanny, (anoda),
- 2 – grafitowa anoda,
- 3 – oczyszczone aluminium,
- 4 – elektrolit,
- 5 – stop anodowy,
- 6 – kanał do zalewania aluminium rafinowanego,
- 7 – wymurówka magnezytowa,
- 8 – wymurówka ogniotrwała,
- 9 – stalowy płaszcz

Wytwarzanie magnezu stanowi drugi pod względem ważności proces produkcyjny oparty na termoelektrolizie stopionych soli.

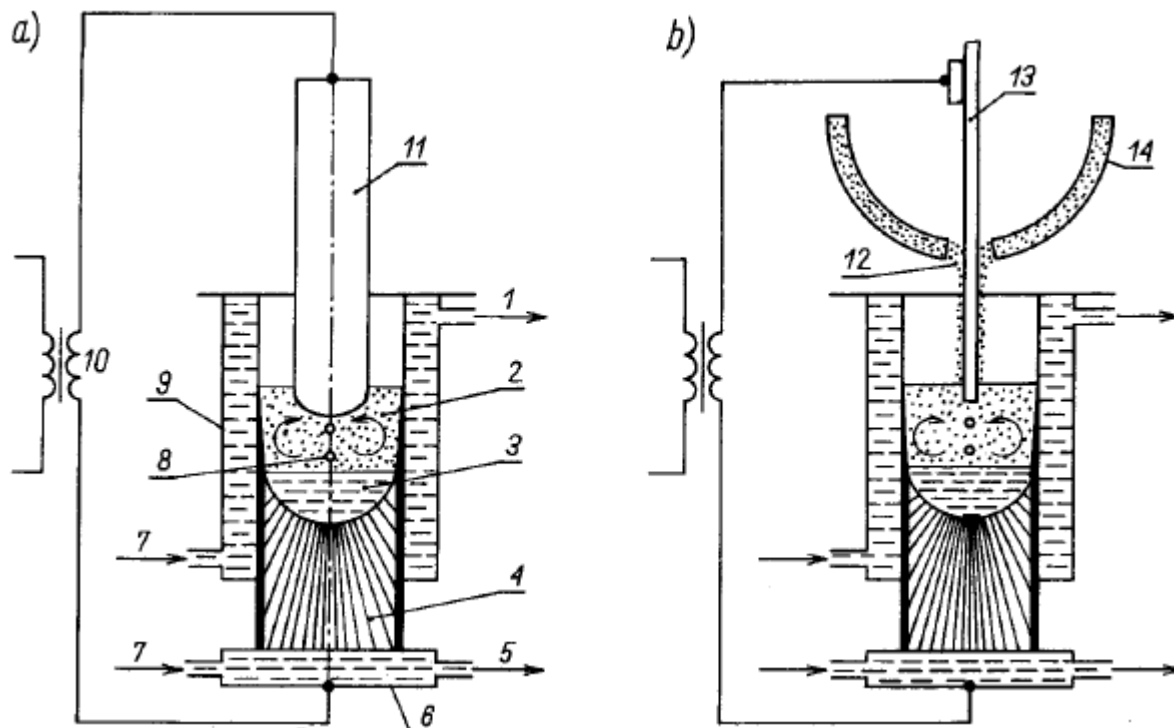
Elektrolitem jest stopiony $MgCl^2$ (ok. 20%) z dodatkami chlorków sodu, potasu i wapnia.



Termoelektrolizer do wytwarzania magnezu

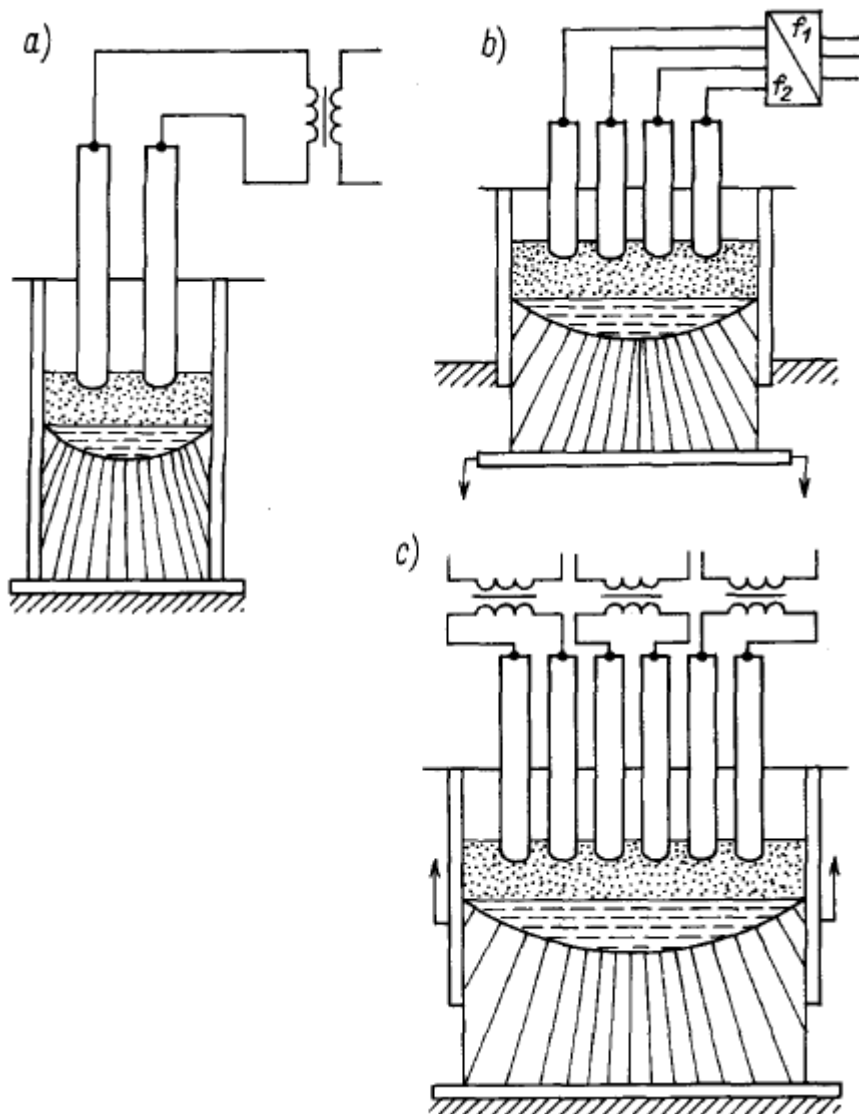
- 1 – pokrywa,
- 2 – przegroda szamotowa,
- 3 – anoda grafitowa,
- 4 – katoda stalowa,
- 5 – magnez,
- 6 – elektrolit,
- 7 – wyłożenie szamotowe,
- 8 – płaszcz stalowy

URZĄDZENIA DO PRZETAPIANIA METALI



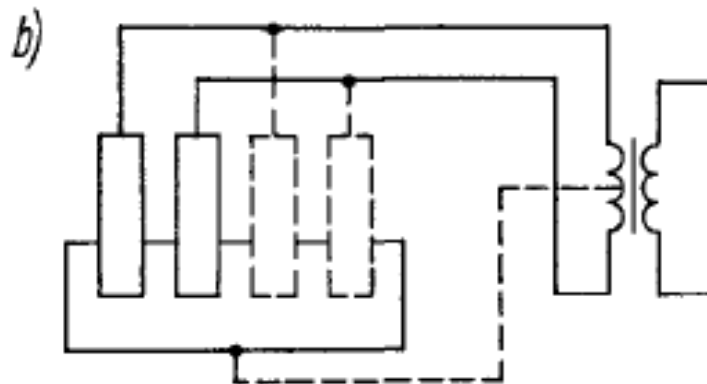
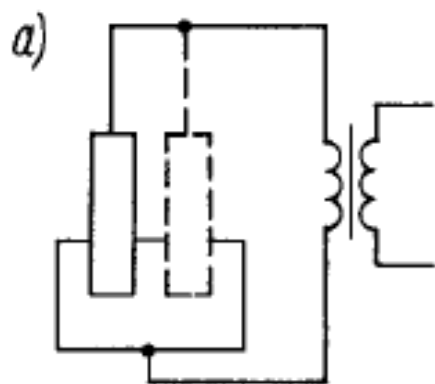
Piece elektrożuźlowe: a) z jedną cylindryczną elektrodą roztapianą; b) z jedną taśmową elektrodą przetapianą oraz z doprowadzaniem wsadu proszkowego

1 – wylot wody chłodzącej krystalizator, 2 – żużel przewodzący, 3 – płynny metal, 4 – wlewki, 5 – wylot wody chłodzącej płytę denną krystalizatora, 6 – płyta denną, 7 – wlot wody chłodzącej, 8 – krople przetapianego metalu, 9 – krystalizator, 10 – transformator zasilający, 11 – roztapiana elektroda, 12 – sproszkowany materiał wsadowy, 13 – taśma wsadowa, 14 – zasypnik proszku

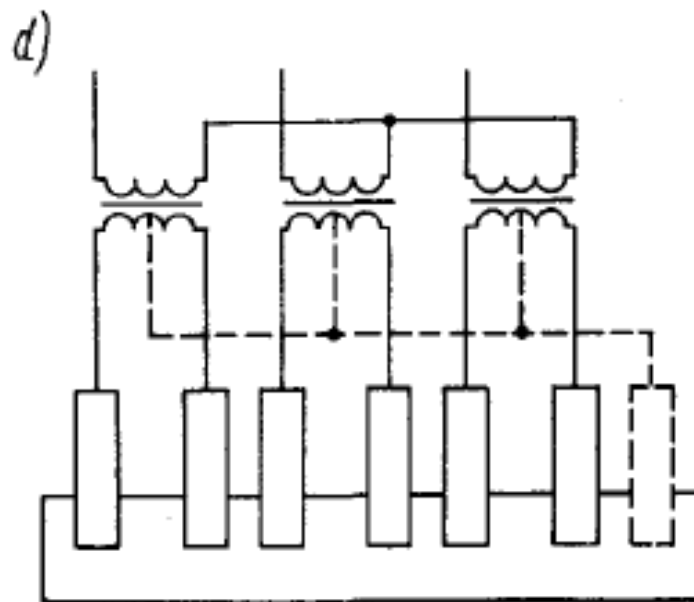
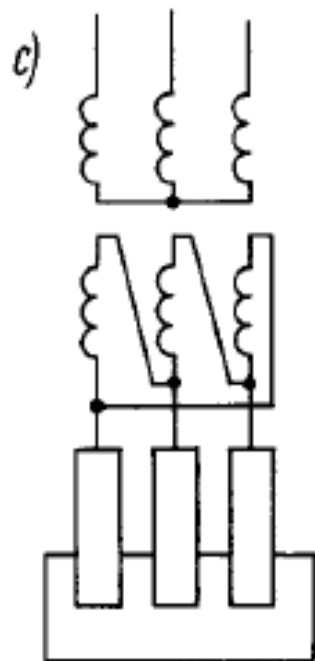


Schematy pieców elektrożużlowych z roztopianymi elektrodami:

- dwuelektrodowy jedno fazowy z nieprzesuwającym krystalizatorem i nieprzesuwaną płytą denną;
- czteroelektrodowy zasilany ze źródła o zmniejszonej i regulowanej częstotliwości oraz z przesuwaną płytą denną i nieruchomym krystalizatorem
- sześcioelektrodowy zasilany z trzech transformatorów jednofazowych z przesuwającym krystalizatorem i nieruchomą płytą denną



Schematy zasilania pieców elektrożuźlowych:



- a) jednofazowy;
- b) dwufazowy;
- c) trójfazowy,
- d) sześćfazowy

NAGRZEWANIE ŁUKOWE

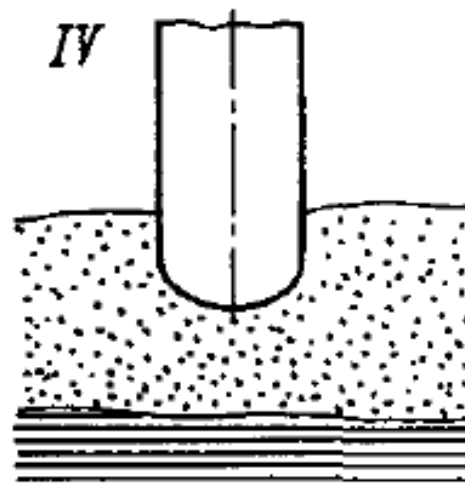
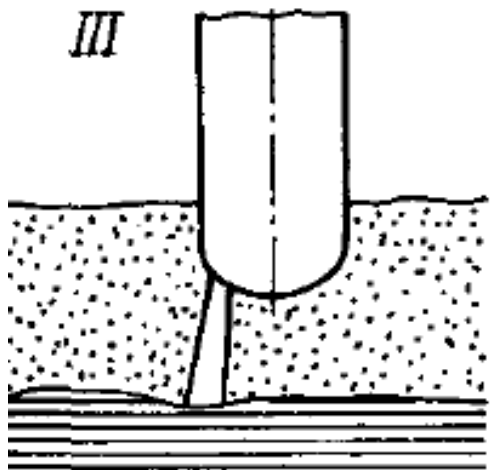
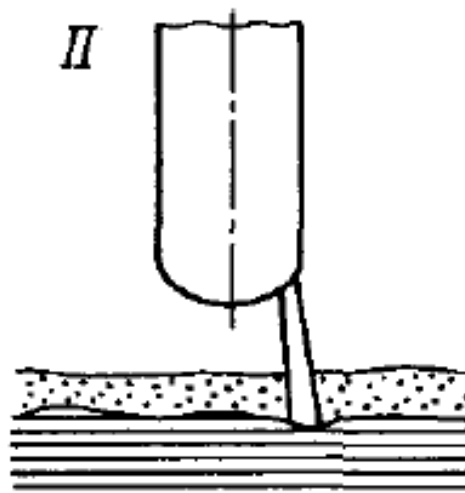
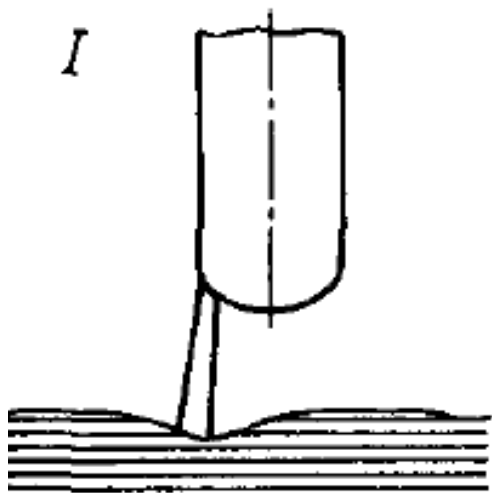
Nagrzewanie łukowe jest to nagrzewanie elektryczne oparte na efekcie Joule'a w gazach dopływających swobodnie do przestrzeni wyładowczej .

Łukiem elektrycznym nazywa się wyładowanie powodowane termoemisją, emisją pod wpływem pola elektrycznego, a także wyładowanie, podczas którego wymienione rodzaje emisji występują równocześnie.

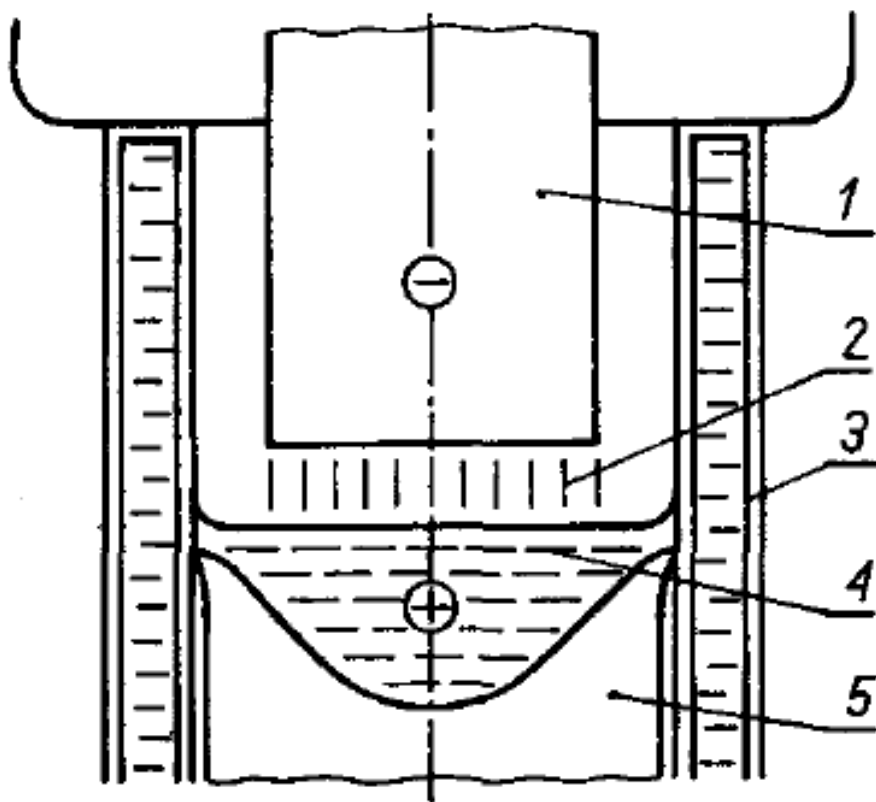
Zapoczątkowanie wyładowania uzyskuje się różnymi sposobami w zależności od ciśnienia gazu, wartości prądu, konstrukcji i przeznaczenia urządzenia łukowego. Wyładowanie łukowe wielkoprądowe inicjowane jest najczęściej w wyniku zwarcia elektrod. Tego rodzaju zwarcie nosi nazwę. eksploatacyjnego.

Prąd zwarcia eksploatacyjnego nagrzewa silnie elektrody w obszarze styku. Rozsuniecie elektrod wywołuje z powierzchni styku tej elektrody, która stanowi katodę, emisję termiczną elektronów. Wskutek dużego natężenia pola elektrycznego w obszarze między elektrodami (przy bardzo małych odległościach między nimi w chwili i zwarcia) następuje jonizacja zderzeniowa gazu i wytworzenie się łuku.

Ten rodzaj inicjacji i wyładowania stosowany jest w większości elektrotermicznych urządzeń łukowych.

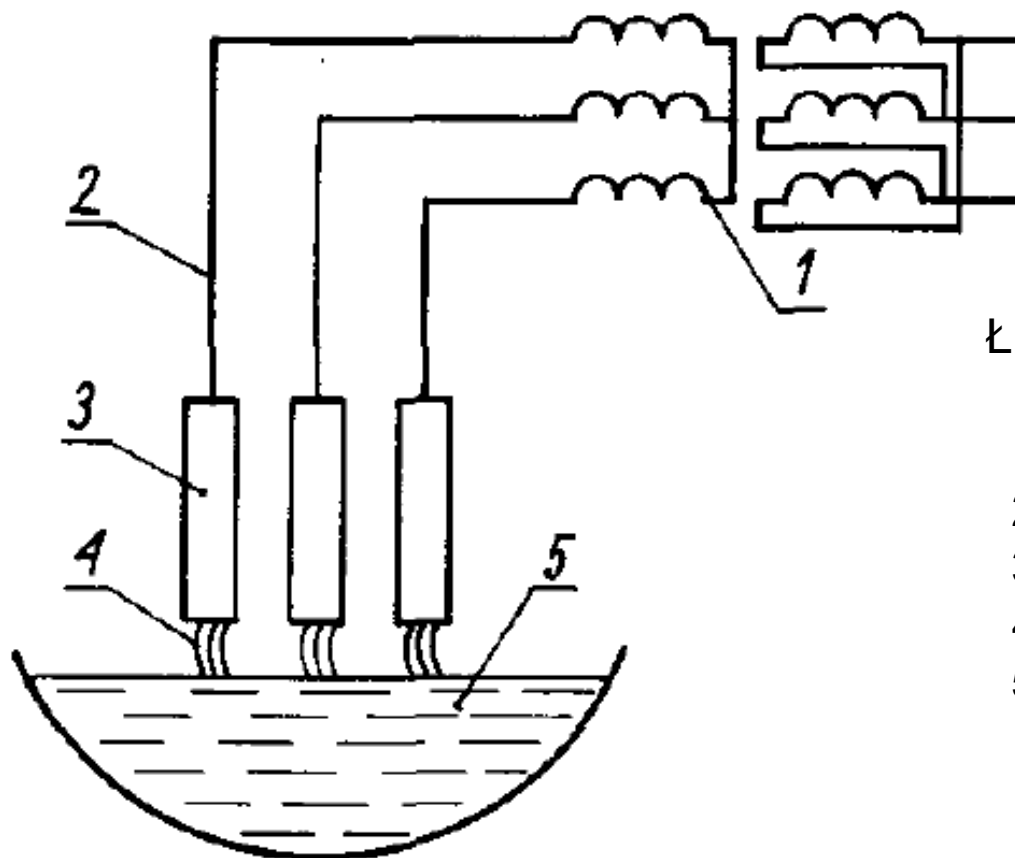


Różne rodzaje łuku w
stalowniczym piecu
łukowym prądu stałego



Łuk w próżniowym piecu łukowym z katodą roztapianą

- 1 – katoda,
- 2 – łuk,
- 3 – krystalizator chłodzony wodą,
- 4 – anoda (kąpiel metalowa),
- 5 – krzepnący wlewek



Łuki bezpośrednie w stalowniczym
urządzeniu łukowym

- 1 – transformator,
- 2 – tor wielkoprądowy,
- 3 – elektroda,
- 4 – łuk,
- 5 – wsad

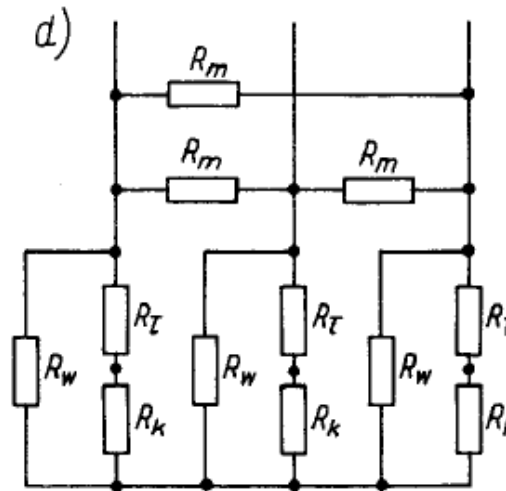
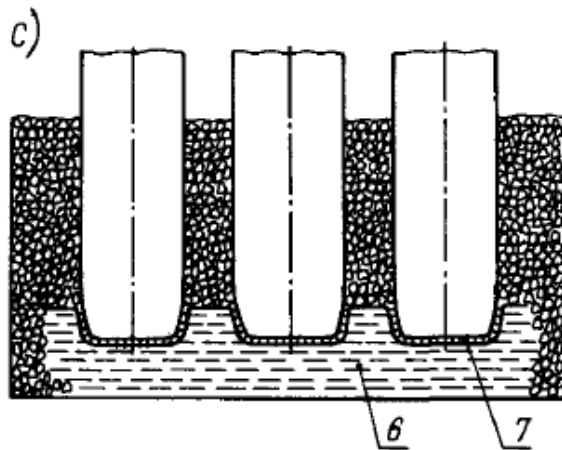
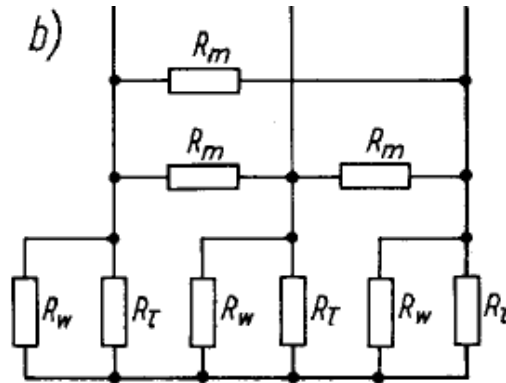
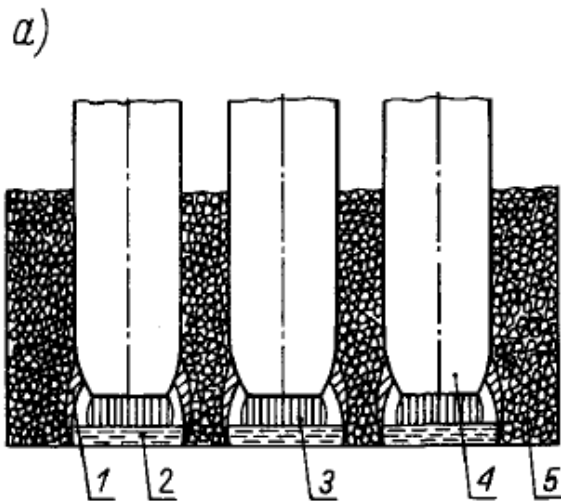
Łuk I rodzaju występuje między elektrodą grafitową i zimnym złodem stalowym podczas jego roztopiania. Napięcie łuku ma kształt zbliżony do prostokątnego z dużym udziałem części stochastycznej, wywoływanej szybkim przemieszczeniem się łuku

Łuk II rodzaju występuje między elektrodą grafitową i wsadem stalowym stopionym. Warunki wyładowania łukowego są w tym przypadku znacznie korzystniejsze z uwagi na wzrost temperatury: elektrod, atmosfery piecowej oraz wszystkich innych elementów znajdujących się w otoczeniu łuku.

Łuk III rodzaju jest „otulony” przez spieniony żużel. Występuje on między elektrodą grafitową i stopionym wsadem z mniejszym lub większym bocznikującym działaniem żużla. Kolumna łuku jest więc przykryta całkowicie żużlem, co istotnie zmienia jego warunki cieplne, a ponadto ogranicza zużycie właściwe energii

Łuk prądu przemiennego w urządzeniach do redukcyjnego wytapiania substancji z rud i z produktów ich przeróbki oraz w urządzeniach do topienia rud jest zawsze bezpośrednim, występującym między elektrodą grafitową (węglową) i wsadem pozostającym w stanie stałym lub ciekłym, a także w obu stanach równocześnie. Ma to wpływ na dość istotne zróżnicowanie łuków w tych urządzeniach.





1 – spieczona warstwa wsadu (ścianki „tygla”),
 2 – wsad stopiony,
 3 – łuk,
 4 – elektroda,
 5 – wsad stały,
 6 – żużel,
 7 – mikrołuki;
 R^l – rezystancja łuku (mikrołuków),
 R^w – rezystancja wsadu stałego R^m – międzyelektrodowa rezystancja wsadu,
 R^k – rezystancja ośrodka ciekłego

Odbiorniki z częściową przemianą energii w łuku i ich schematy zastępcze:

a) łukowo- rezystancyjny i jego schemat zastępczy

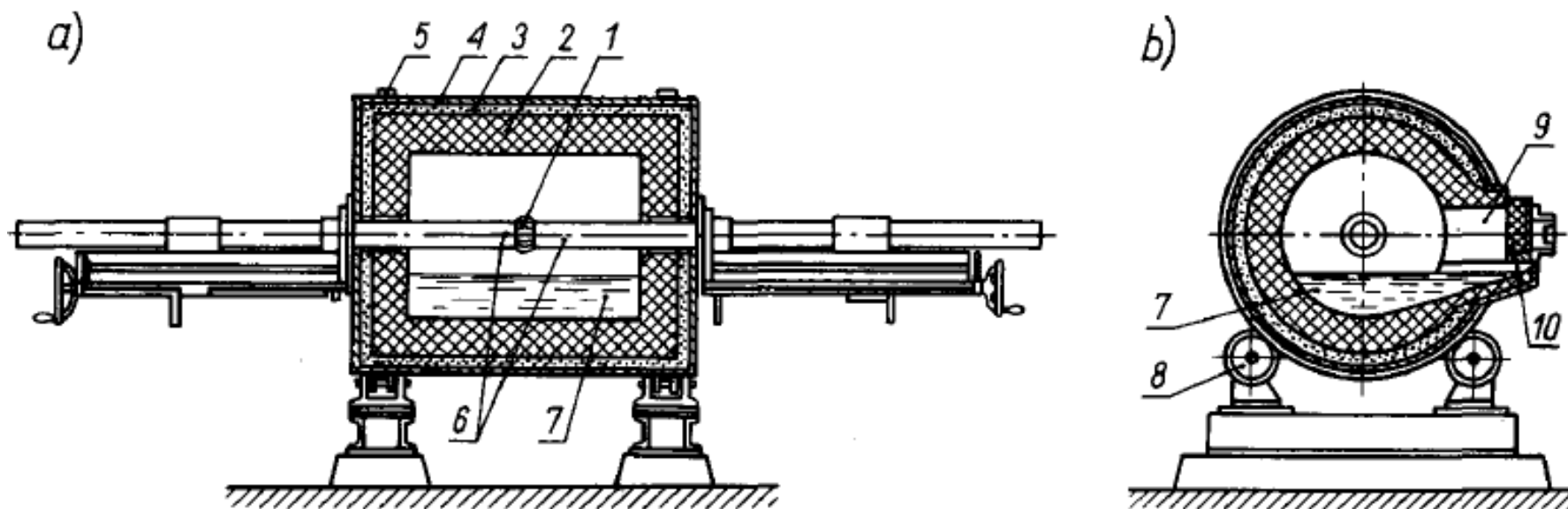
b) , c) łukowo – rezystancyjno - elektrodowy i jego schemat zastępczy d)

URZĄDZENIA ŁUKOWE Z PIECAMI WYTOPOWYMI PRĄDU PRZEMIENNEGO

Urządzenia łukowe z piecami wytopowymi prądu przemiennego, jako podstawowymi ich członami, zalicza się do urządzeń elektrotermicznych z nagrzewaniem pośrednim wsadu. Przeznaczone są one do wytwarzania stopów oraz innych metali. Ten sposób nagrzewania jest realizowany zarówno w piecach o **łuku pośrednim** (wyładowanie między elektrodami, z których żaden nie jest wsadem), jak i w piecach o **łuku bezpośrednim** (wyładowanie między elektrodą i wsadem).

Urządzenia z piecami o łuku pośrednim są z reguły odbiornikami jednofazowymi o maksymalnych pojemnościach wsadowych

Pierwsza z odmian, jest bardziej rozpowszechniona. Wsad nagrzewa się w wyniku bezpośredniego promieniowania łuku oraz pośrednio przez przejmowanie ciepła z nagrzanej warstwy materiału ogniotrwałego zwłaszcza przez styk metalu z ceramiką podczas wahań bębna o $180\div 200^\circ$ od położenia poziomego. Ruchy wahadłowe z szybkością $0,1\div 0,2$ rad/s są realizowane za pośrednictwem napędu elektrycznego jednej z czterech rolek, na których spoczywa bęben. Elektrody grafitowe przechodzą przez ściany czołowe pieca



Piec bębnowy o łuku pośrednim:

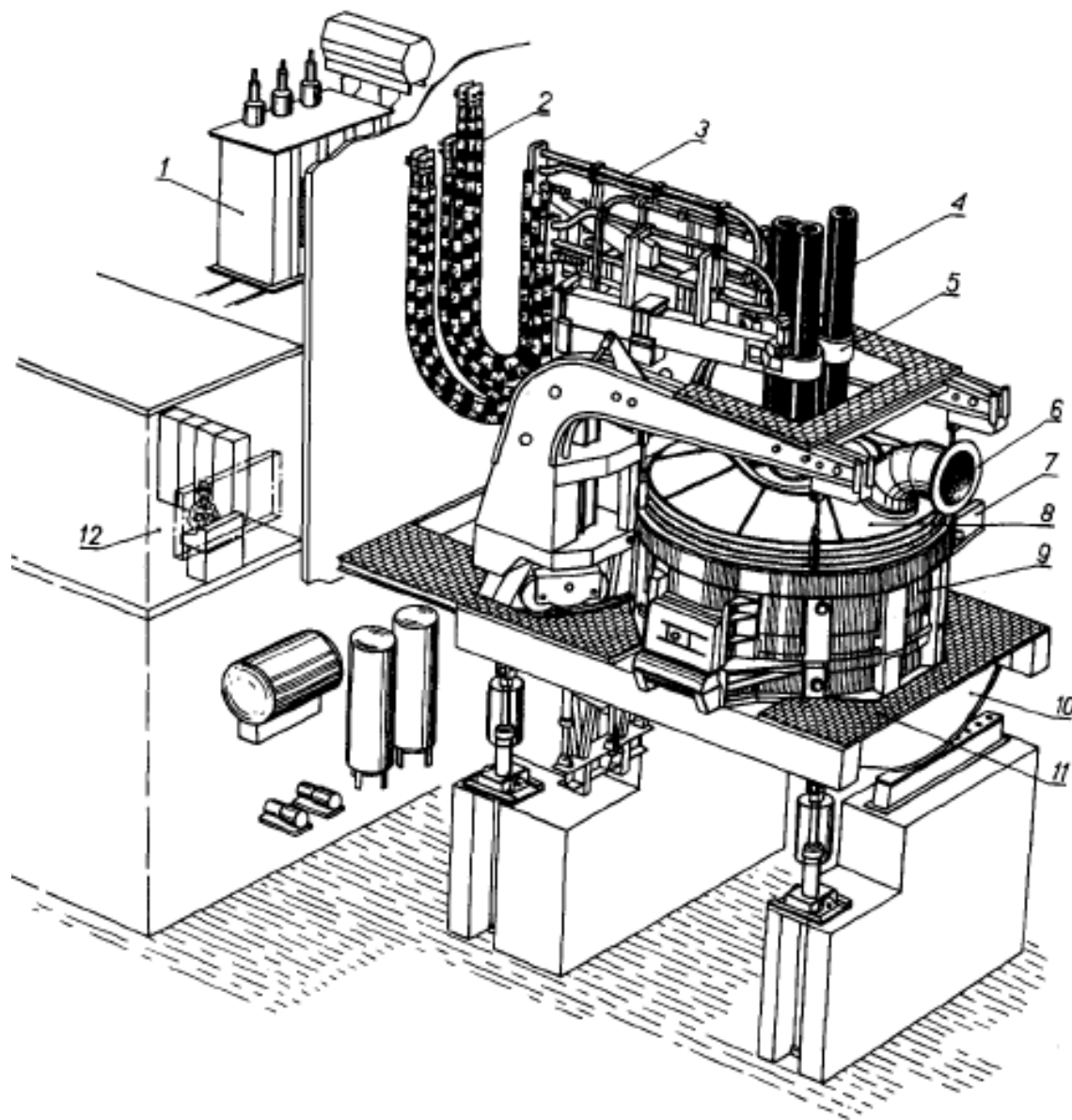
- a) przekrój podłużny;
- b) b) przekrój poprzeczny

1 – łuk, 2 – wyprawa ogniotrwała, 3 – izolacja cieplna, 4 – obudowa, 5 – obręcz, 6 – elektroda grafitowe, 7 – wsad, 8 – rolki, 9 – lej spustowy, 10 - drzwiczki

Druga odmiana urządzeń o łuku pośrednim – z piecami do odlewania precyzyjnego – charakteryzuje się bardzo małymi pojemnościami (do 40 kg) i mocami rzędu kilkudziesięciu kV·A. Piec jest ładowany od góry przez otwór, który służy zarazem do spustu metalu w formę po jej przymocowaniu do pieca i odwróceniu obu połączonych członów o 180°

Urządzenia z piecami o łuku bezpośrednim mają podstawowe znaczenie w metalurgii i odlewnictwie. Spośród wielu odmian najbardziej rozpowszechniły się piece trójfazowe trójelektrodowe z dnem nieprzewodzącym opracowane przez Heroulte'a.

Stanowią one, obok konwertora tlenowego, podstawowy agregat nowoczesnej metalurgii.



Stalownicze urządzenia
łukowe z trójfazowym piecem
wytopowym

1 – transformator piecowy,
2 – część giętka toru
wieloprądowego (kable
chłodzone wodą),

3 – część sztywna toru (rury
chłodzone wodą),

4 – elektrody,

5 – uchwyty elektrod,

6 – odprowadzenie gazów i
pyłów piecowych,

7 – rynna spustowa,

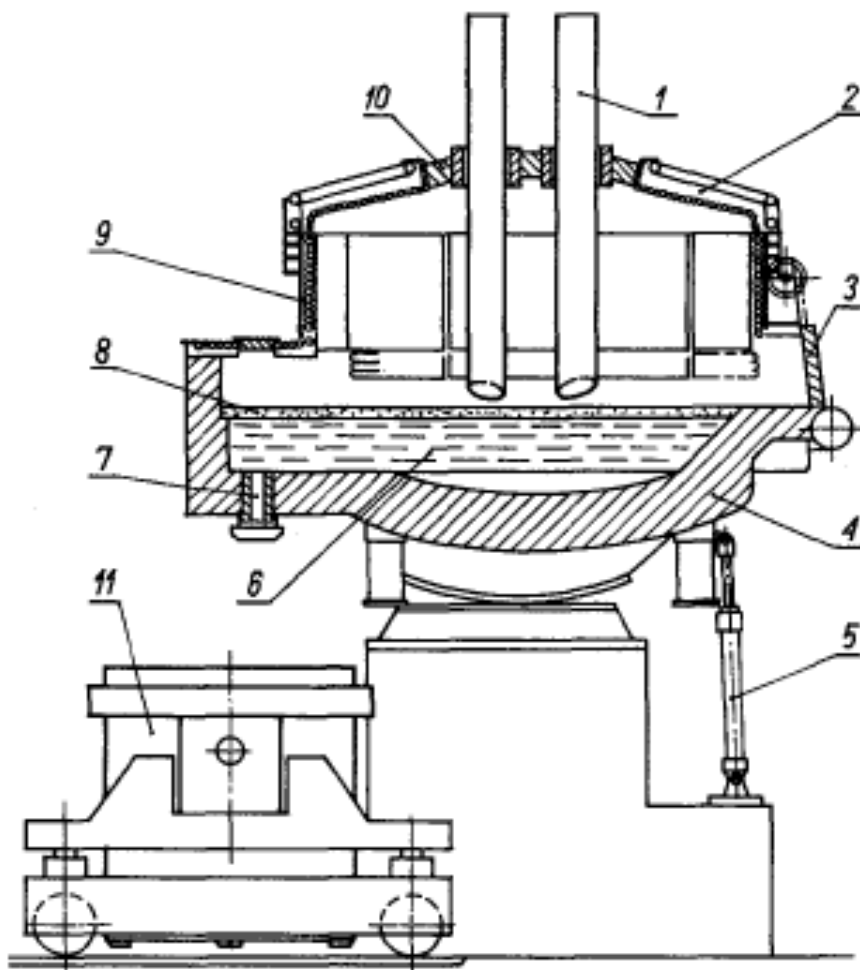
8 – sklepienie pieca,

9 – kocioł pieca,

10 – jedna z dwóch kołysek
stanowiących podstawę
platformy

11 i umożliwiającą
przechylenie pieca,

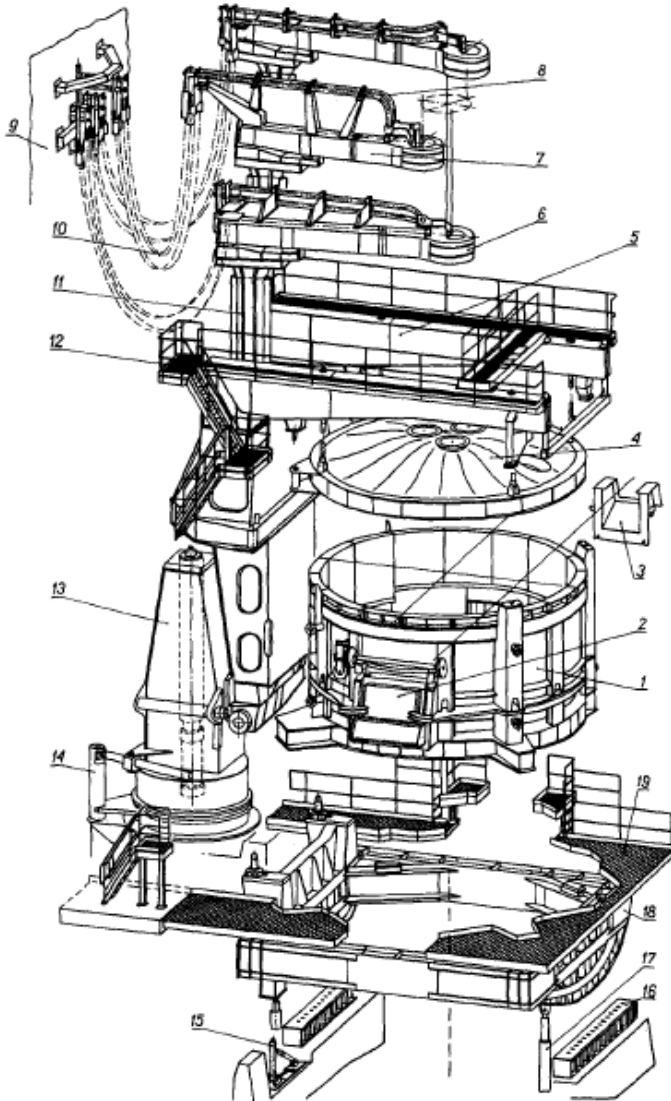
12 – sterownia



Przekrój pieca łukowego

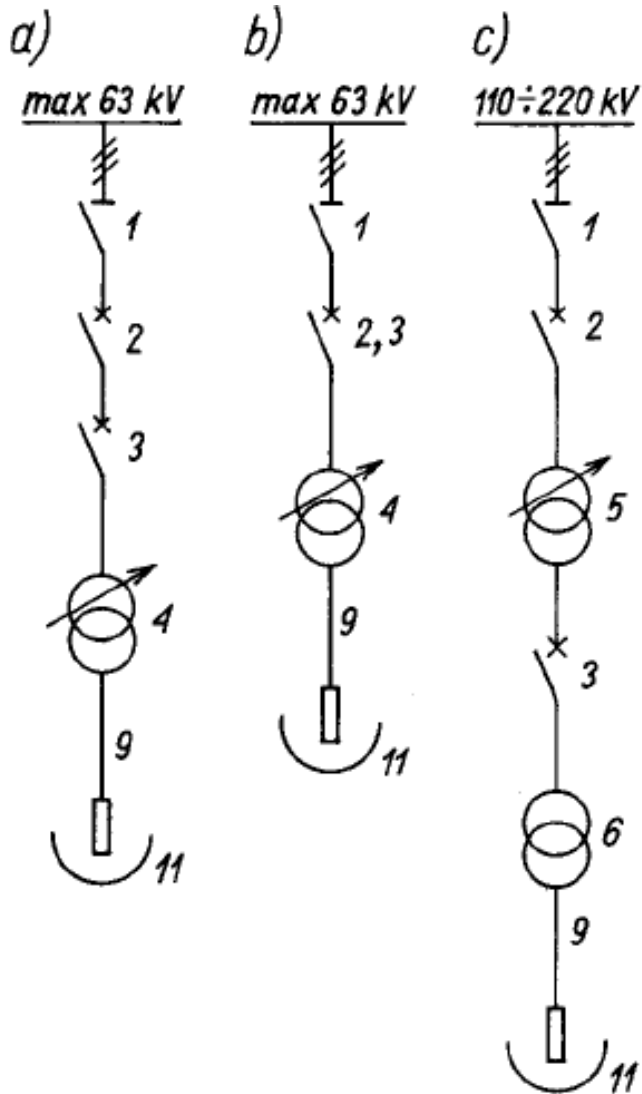
- 1 – elektrody,
- 2 – sklepienie częściowo chłodzone wodą,
- 3 – okno wsadowe,
- 4 – trzon,
- 5 – hydrauliczny układ przechyłu pieca,
- 6 – kąpiel stalowa,
- 7 – otwór spustowy,
- 8 – żużel,
- 9 – cylindryczna ściana boczna chłodzona wodą,
- 10 – środkowa część ceramiczna sklepienia,
- 11 – kadź na metal spuszczone z pieca

STALOWNICZE TRÓJFAZOWE PIECE WYTOPOWE O ŁUKACH BEZPOŚREDNICH



Elementy składowe stalowniczego trójfazowego pieca wytopowego o łukach bezpośrednich

1 – kocioł, 2 – okno wsadowe (robocze),
 3 – lej spustowy, 4 – sklepienie, 5 – ramię mechanizmu unoszenia sklepienia, 6 – uchwyt elektrody, 7 – wsięgnik elektrody,
 8 – elektryczny przewód rurowy, 9 – ściana pomieszczenia transformatora, 10 – giętka część toru wielkoprądowego, 11 – stojak teleskopowy, 12 – schody na podesty umieszczone na wsięgnikach, 13 – napęd mechanizmu unoszenia sklepienia,
 14 – mechanizm odchylania sklepienia, 15 – urządzenie do aretowania pieca, 16 – bieżnia kołyski, 17 - układ hydrauliczny przechyłu pieca, 18 – kołyska, 19 – przechylna platforma



Schematy układów elektrycznych urządzeń łukowych:

a); b) układy jednotransformatorowe

c) układ dwutransformatorowy;

d); e); f) układy jednotransformatorowe z trójnym uzwojeniem regulacyjnym

1 – odłącznik,

2 – wyłącznik zabezpieczający,

3 – wyłącznik manewrowy,

4 – transformator piecowy regulacyjny dwuuzwojeniowy,

5 – transformator regulacyjny dwuuzwojeniowy,

6 – transformator piecowy dwuuzwojeniowy,

7 – transformator piecowy z uzwojeniem trójnym regulacyjnym,

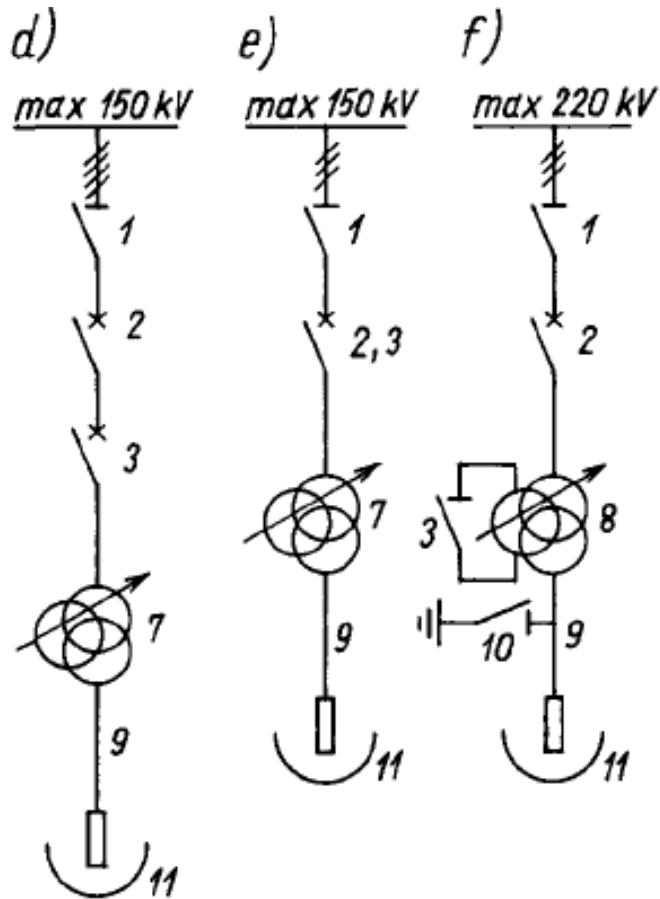
8 – transformator piecowy z uzwojeniem trójnym regulacyjnym i wyłącznikiem manewrowym na

uzwojeniu pośrednim,

9 – tor wielkoprądowy,

10 – uziemnik,

11 – piec łukowy



Schematy układów elektrycznych urządzeń łukowych:

a); b) układy jednotransformatorowe

c) układ dwutransformatorowy;

d); e); f) układy jednotransformatorowe z trójnym uzwojeniem regulacyjnym

1 – odłącznik,

2 – wyłącznik zabezpieczający,

3 – wyłącznik manewrowy,

4 – transformator piecowy regulacyjny dwuuzwojeniowy,

5 – transformator regulacyjny dwuuzwojeniowy,

6 – transformator piecowy dwuuzwojeniowy,

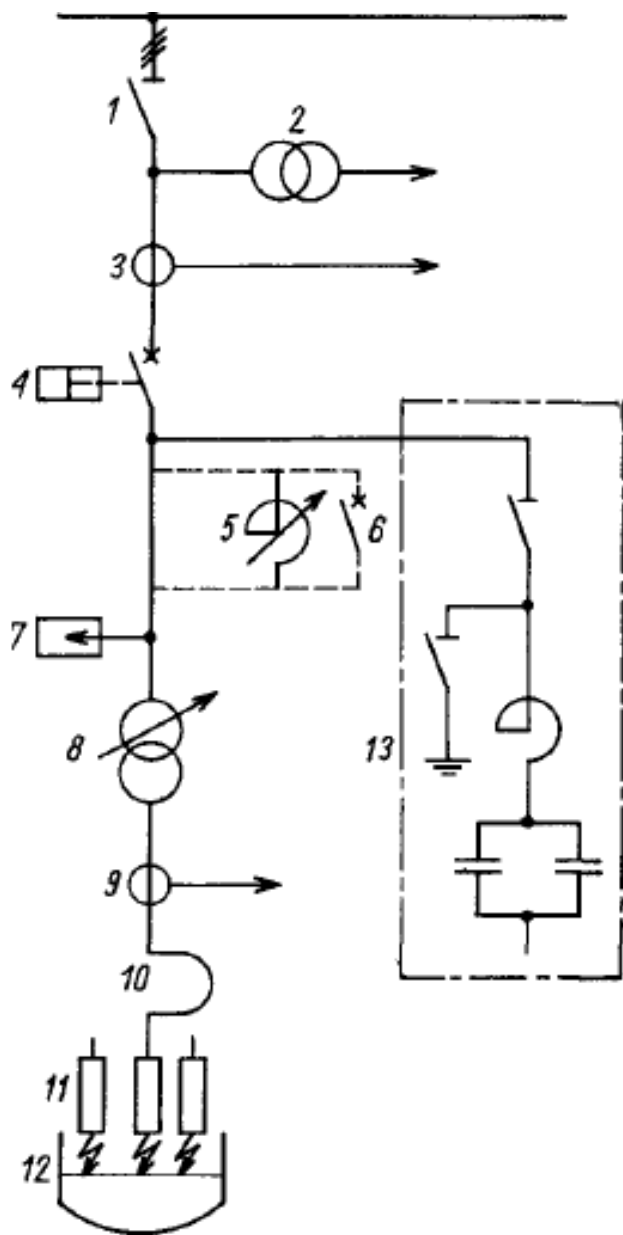
7 – transformator piecowy z uzwojeniem trójnym regulacyjnym,

8 – transformator piecowy z uzwojeniem trójnym regulacyjnym i wyłącznikiem manewrowym na uzwojeniu pośrednim,

9 – tor wielkoprądowy,

10 – uziemnik,

11 – piec łukowy



Schemat zasilania pieca łukowego z sieci średniego napięcia

- 1 – odłącznik,
- 2 – przekładnik napięciowy,
- 3 – przekładnik prądowy,
- 4 – wyłącznik pneumatyczny (manewrowy i zabezpieczający),
- 5 – dławik z łącznikiem zwierającym
- 6 (tylko w urządzeniach o małej mocy),
- 7 – odgromnik,
- 8 – transformator piecowy,
- 9 – przekładnik prądowy,
- 10 – tor wielkoprądowy,
- 11 – elektrody,
- 12 – piec łukowy,
- 13 – układ kompensacji mocy biernej i filtracji wyższych harmoniczných

Odłącznik wysokiego napięcia jest pierwszym z głównych elementów układu zasilania pieca i jest przeznaczony do odłączania urządzenia łukowego od sieci w stanie bezprądowym, tzn. po uprzednim przerwaniu obwodu prądowego przez wyłącznik. Używany jest przy dłuższych postojach urządzenia, podczas remontów i przeglądów zwłaszcza części wysokonapięciowej.

Przekładnik napięciowy służy do obniżenia napięcia sieciowego do wartości używanej w układach pomiarowych, automatyki i zabezpieczeniowych.

Przekładnik prądowy po stronie wysokiego napięcia jest przeznaczony do dopasowania sygnału prądowego do wejść układów pomiarowych, automatyki i zabezpieczeniowych. Jest on, podobnie jak przekładnik napięciowy, umieszczony w każdej fazie.

Dławik jest stosowany w torze elektrycznym po stronie wysokiego napięcia tylko w urządzeniach o mocach mniejszych od 10 MVA, charakteryzujących się małą całkowitą reaktancją toru elektrycznego, nie zapewniającą stabilności wyładowania łukowego oraz dostatecznego ograniczenia prądów zwarć eksploatacyjnych. Dławik jest zwierany wyłącznikiem po roztopieniu wsadu gdy łuk stabilizuje się, a prawdopodobieństwo zwarć jest znikome.

Wyłącznik jest jednym z najważniejszych elementów układu zasilania pieca, a od jego niezawodności w dużym stopniu zależy poprawność działania całego urządzenia. Służy on do przerywania obwodu prądowego pod obciążeniem.

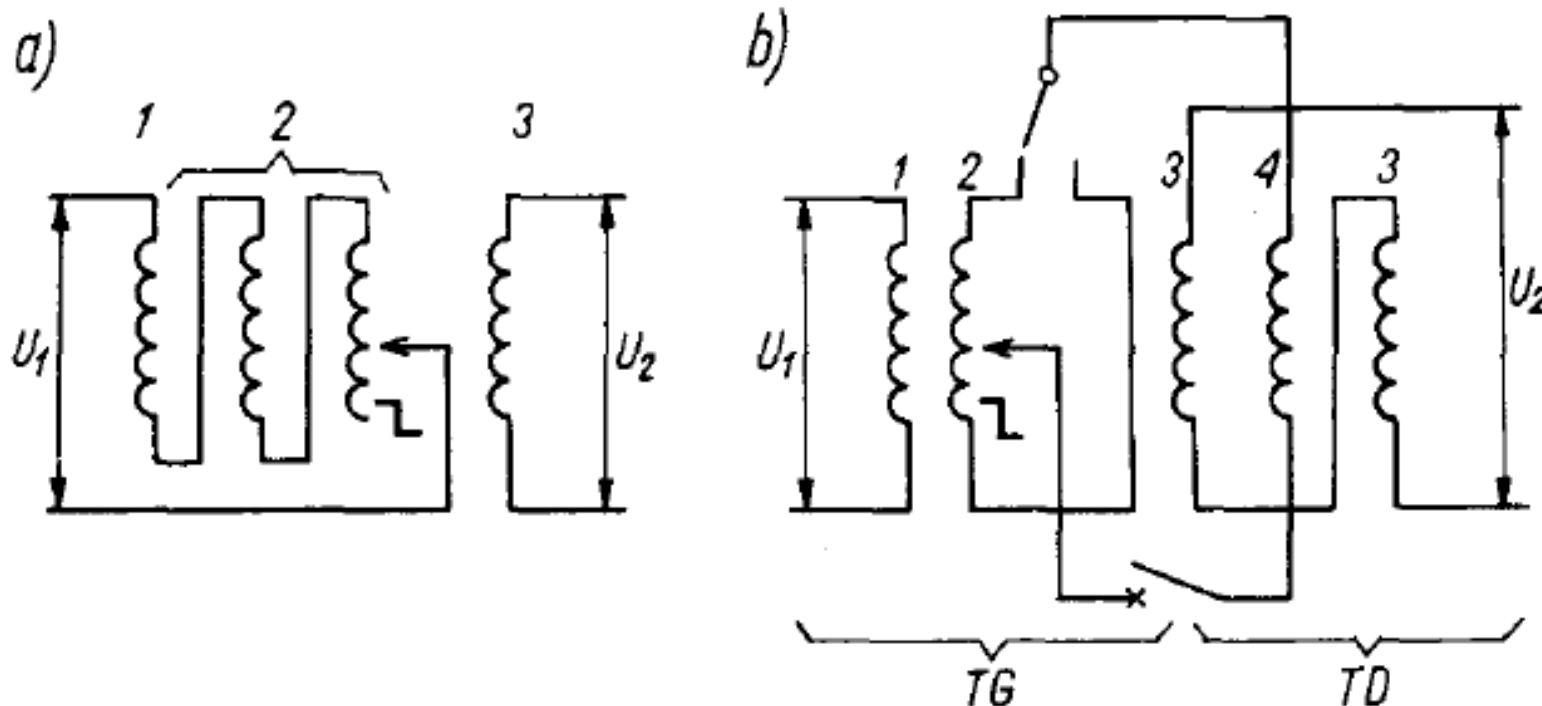
Przy wystąpieniu zwarcia awaryjnego po stronie wysokiego napięcia powinien automatycznie, po czasie nie dłuższym od $0,1 \div 0,15$ s, wyłączyć urządzenie. W przypadku zwarcia eksploatacyjnego (zwarcie elektrod ze wsadem) powinien zadziałać z opóźnieniem $3 \div 5$ s, o ile do tego czasu automatyka ruchu elektrod nie doprowadzi do wytworzenia łuku.

Służy on ponadto do przeprowadzania operacji włączeń i wyłączeń pieca związanych z normalną jego eksploatacją, np. podczas załadunku, spustu, przedłużania elektrod, a także przy zmianie napięcia, o ile transformator nie jest wyposażony w układ zmiany napięcia pod obciążeniem.

Liczba łączeń pieców dużej mocy wykonywanych w ciągu roku sięga 30000

Transformator regulacyjny w preferowanych współcześnie układach zasilania pieców łukowych, jest jedynym elementem dopasowującym napięcie sieci zasilającej do odbiornika łukowego. Jest to konstrukcja specjalna, którą charakteryzuje:

- 1) bardzo duża wytrzymałość mechaniczna, co ma związek z częstymi udarami! prądowymi powodowanymi m.in. zwarciami eksploatacyjnymi;
- 2) wytrzymałość na przeciążenia umożliwiająca znoszenie częstych kilkusekundowych zwarc eksploatacyjnych oraz w większości dotychczasowych konstrukcji 20÷25%-owego stałego przeciążenia w fazie roztopiania wsadu;
- 3) odpowiedni zakres regulacji napięcia wtórnego $U_{2p,max} - U_{2p,min}$ dostosowany do poszczególnych faz procesu technologicznego. Wymagania te spełniają olejowe transformatory płaszczone jak i bezpłaszczowe z chłodzeniem naturalnym; bądź sztucznym wyłącznie zewnętrznym jak i mieszanym (chłodzenie wodne przy użyciu wymiennika umieszczonego w oleju).



Zasady regulacji napięcia transformatorów piecowych:

- a) regulacja bezpośrednia (1 – uzwojenie główne, 2 – uzwojenie regulacyjne, 3 – uzwojenie wtórne);
- b) regulacja pośrednia (1 – uzwojenie wysokonapięciowe, 2 – uzwojenie trójne, 3 – uzwojenia niskonapięciowe transformatora głównego i dodatkowego, 4 – uzwojenie pierwotne transformatora dodatkowego)

TG – transformator główny, TD – transformator dodatkowy)

U_1 – napięcie pierwotne, U_2 – napięcie wtórne

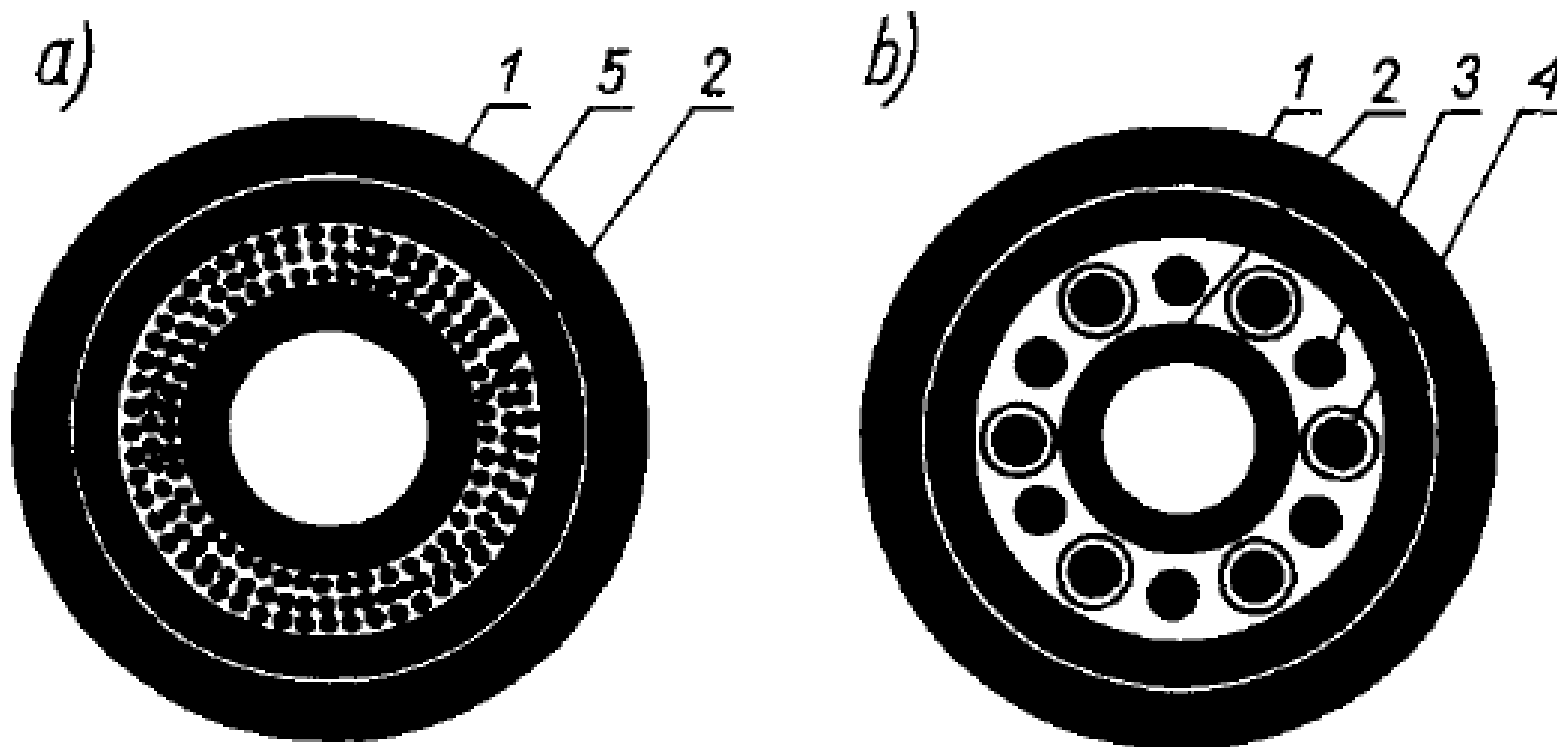
Moc transformatora piecowego utożsamiana jest zwykle z mocą urządzenia łukowego. Jej wartość jest w pierwszym rzędzie zależna od pojemności wsadowej pieca. Zależy ona także od generacji urządzenia w skład którego transformator wchodzi. Niekiedy iloraz mocy transformatora i pojemności wsadowej pieca jest wyróżnikiem czterech kategorii urządzeń łukowych o mocy:

- normalnej (RP) – $80 \div 350 \text{ kV}\cdot\text{A/Mg}$,
- wielkiej (HP) – $170 \div 470 \text{ kV}\cdot\text{A/Mg}$,
- ultrawielkiej (UHP) – $250 \div 650 \text{ kV}\cdot\text{A/Mg}$,
- super ultrawielkiej (SUHP) – $400 \div 1000 \text{ kV}\cdot\text{A/Mg}$.

Tor wielkoprądowy jest zespołem przewodników doprowadzających prąd z transformatora piecowego do odbiornika jakim jest łuk elektryczny. Odbiornikiem (rezystancyjnym) jest także część elektrody znajdująca się w przestrzeni roboczej pieca oraz ta część wsadu, przez którą przepływa prąd do znajdującego się w nim punktu zerowego. Rezystancja elektrody od jej uchwytu do końca znajdującego się w przestrzeni roboczej stanowi (bez rezystancji transformatora) ok. 60% całkowitej rezystancji toru wielkoprądowego, dlatego przy określaniu mocy strat oraz sprawności elektrycznej urządzenia faktu tego nie można pominąć

Elementami toru wielkoprądowego (licząc od transformatora) są:

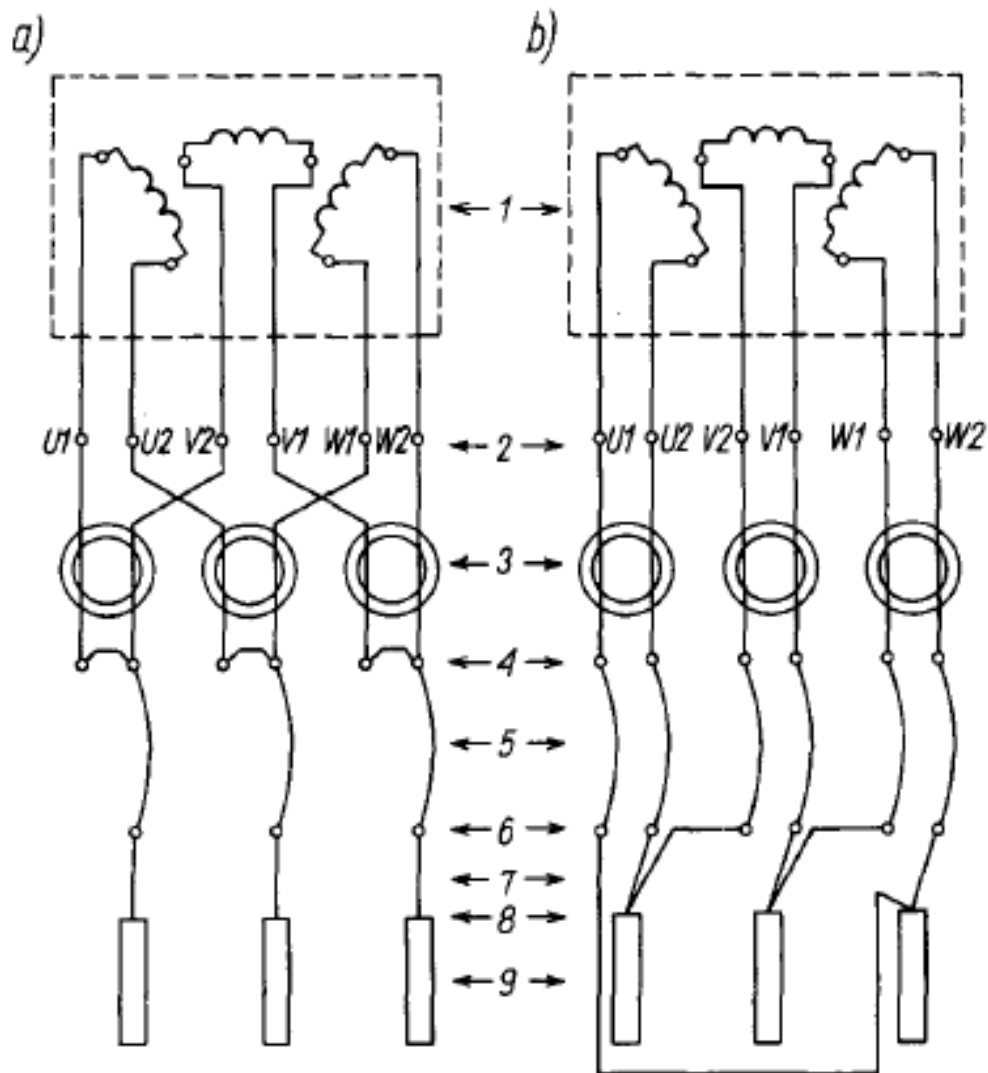
- a) kompensator w postaci elastycznych taśm łączących wyprowadzenie transformatora piecowego z krótkim nieruchomym odcinkiem toru. Jest on przeznaczony do kompensacji zmian wymiarów odcinka nieruchomego pod wpływem temperatury, a więc likwidacji mechanicznych obciążeń uszczelnień wyprowadzeń z transformatora;
- b) nieruchomy odcinek toru w postaci pakietu szyn;
- c) nieruchomy łącznik będący elementem pośredniczącym między pakietem szyn i giętką częścią toru;
- d) część giętka toru (wiązka gołych kabli miedzianych chłodzonych naturalnie lub kable chłodzone wodą. Ta część toru zlokalizowana jest między dwoma łącznikami nieruchomym i ruchomym, przemieszczającym się razem z wysięgnikiem elektrody i umieszczonymi na nim ruroprowadzami. Część giętka toru umożliwia przechył pieca w celu spustu żużla i metalu;



Przekroje chłodzonych wodą kabli części giętkiej toru wieloprądowego:

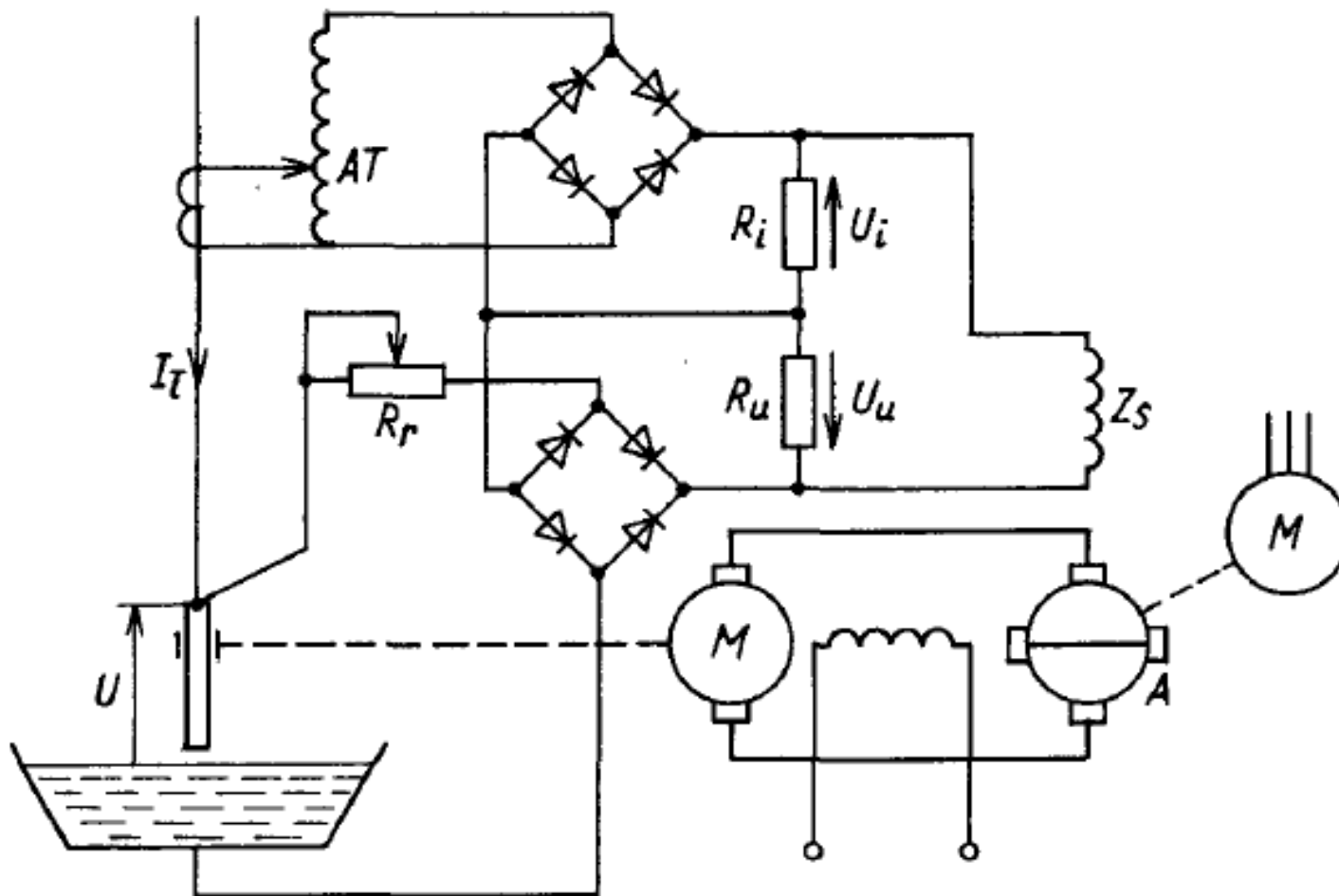
- a) kabel o konstrukcji koncentrycznej;
- b) kabel o konstrukcji linowej

1 – gumowa dwuwarstwowa powłoka zewnętrzna, 2 – rdzeń nośny, 3 – linka przewodząca gola, 4 – linka przewodząca w perforowanej powłoce gumowej (rozwiązanie zapobiegające zgrzewaniu się poszczególnych lin), 5 – przewody miedziane

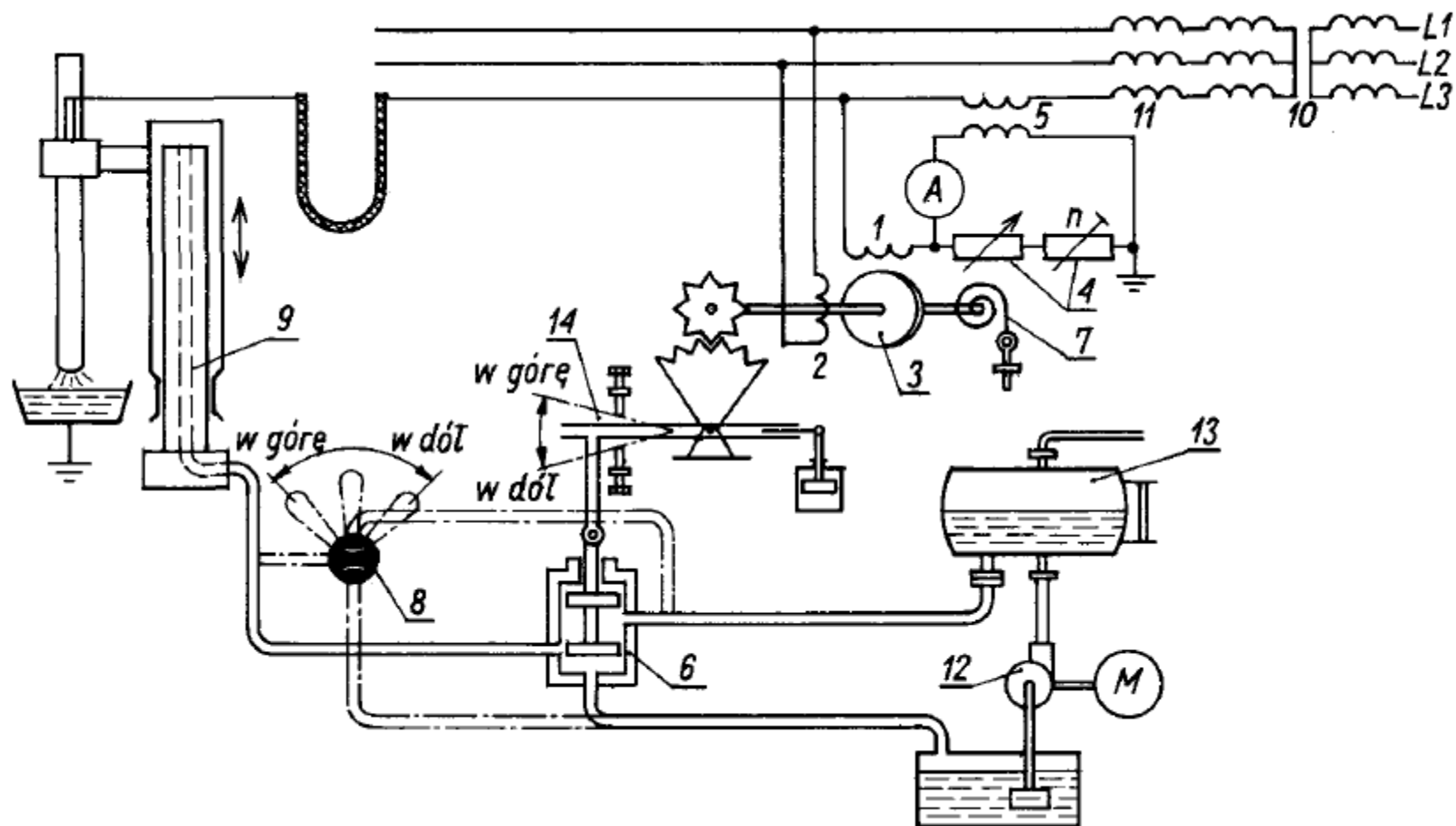


Schematy torów wieloprądowych:
 a) triangulowany (uzwojenie transformatora połączone w trójkąt na ruchomych łącznikach);
 b) bifilarny (uzwojenie transformatora połączone w trójkąt na uchwytach elektrod)

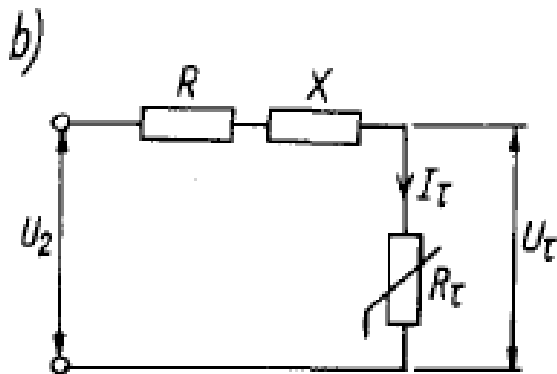
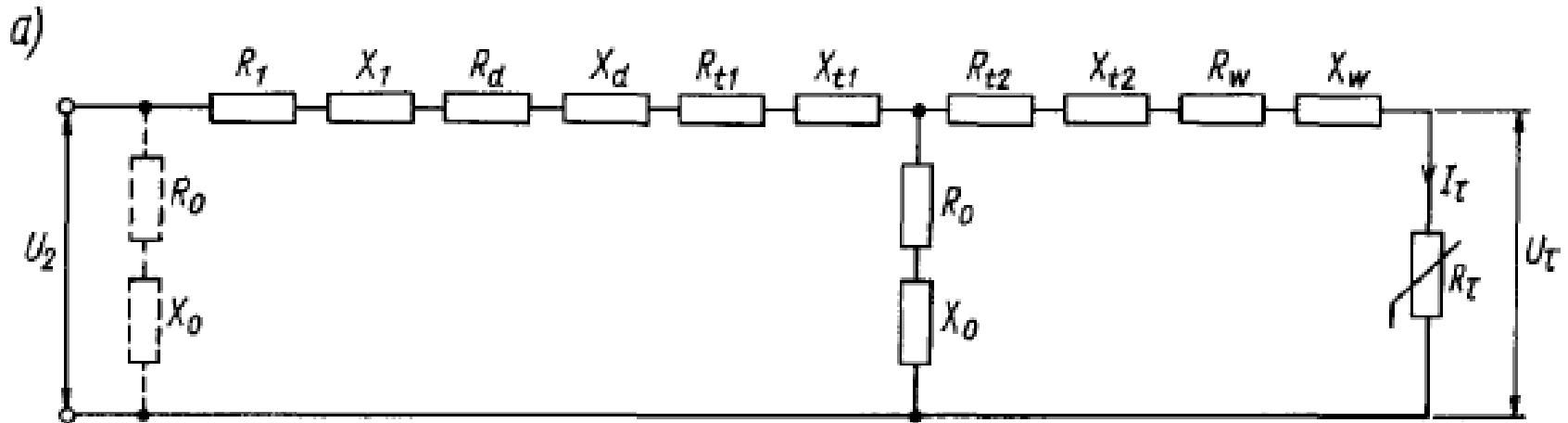
1 – wtórne uzwojenie transformatora,
 2 – kompensatory,
 3 – przekładniki prądowe lub cewki Rogowskiego,
 4 – nieruchome łączniki,
 5 – części giętkie toru,
 6 – ruchome łączniki,
 7 – ruro-przewody,
 8 – uchwyty elektrod,
 9 – elektrody



Schemat układu elektromechanicznej automatyki łuku ze wzmacniaczem amplidynowym



Schemat układu elektrohydraulicznej automatyki łuku wykorzystującej zasadę silnika Ferrarisa
 1 – uzwojenie robocze, 2 – uzwojenie wzbudzenia, 3 – wirnik, 4 – rezystory do nastawiania wartości zadanej, 5 – przekładnik prądowy, 6 – główny sterujący zawór hydrauliczny, 7 – sprężyna cofająca, 8 – ręczny zawór sterujący, 9 – siłownik hydrauliczny, 10 - transformator piecowy, 11 – dławik, 12 – pompa, 13 – zbiornik ciśnieniowy, 14 – regulacja zaworu



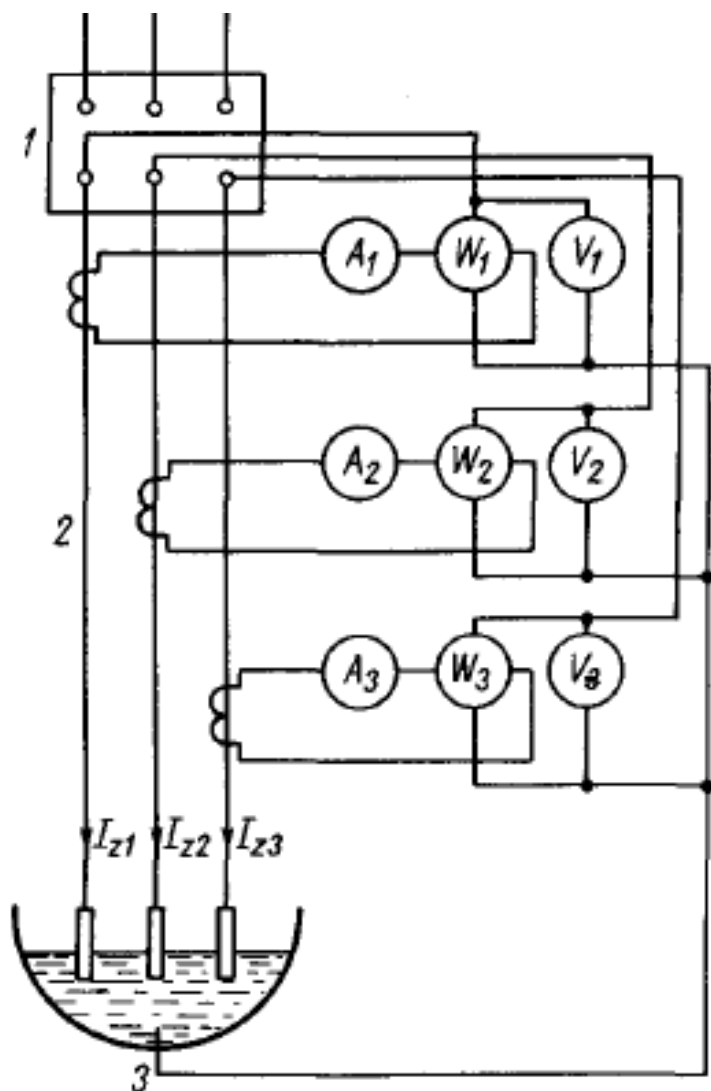
Schemat elektryczny urządzenia łukowego:

a) pełny;

b) b) uproszczony

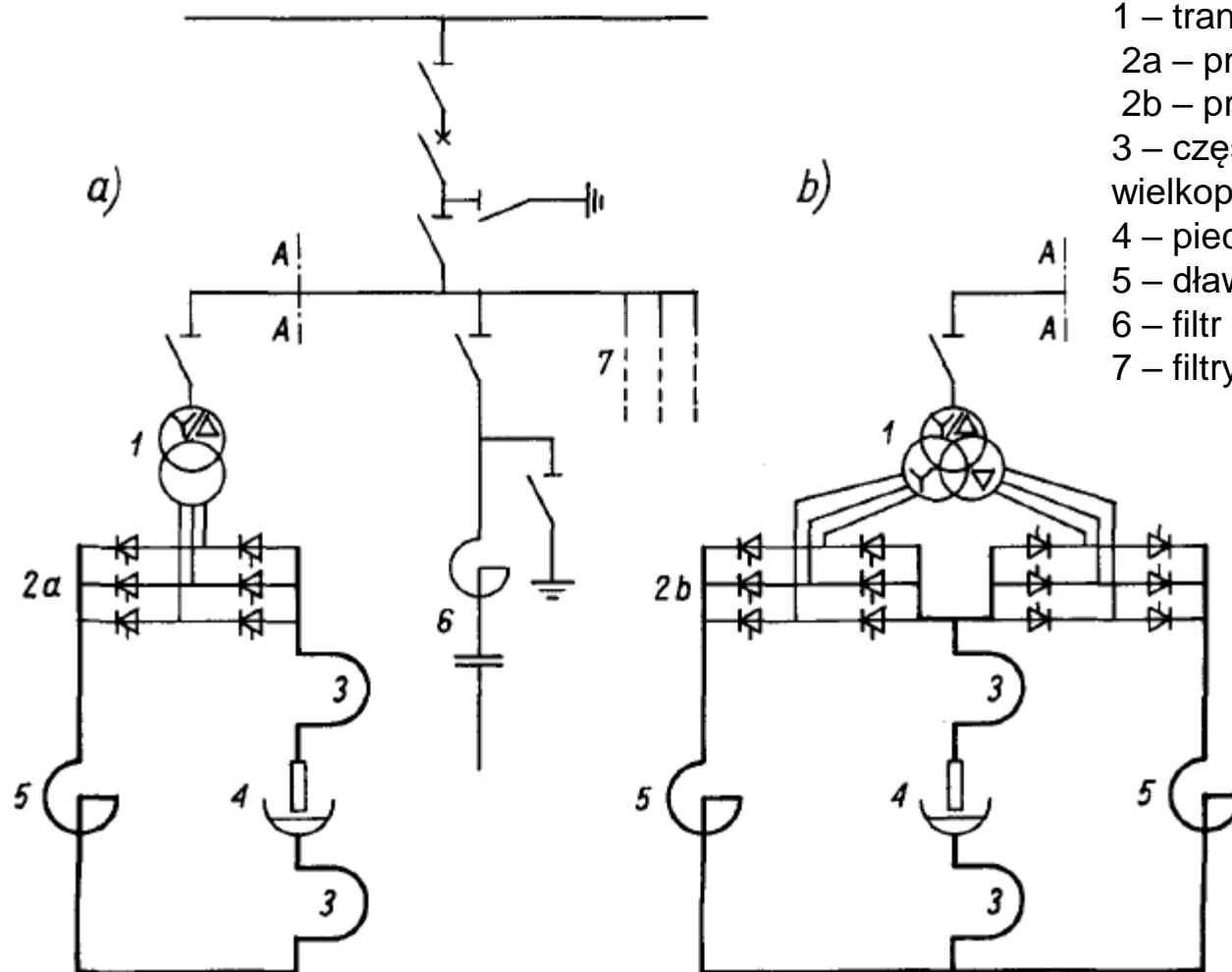
R^1 , X^1 – parametry toru elektrycznego po stronie wysokiego napięcia; R^d , X^d – parametry dławika;

R^{t1} , X^{t1} , R^{t2} , X^{t2} – parametry transformatora piecowego po stronie wysokiego i niskiego napięcia; R^w , X^w – parametry toru wieloprądowego; R^{t1} – rezystancja łuku; R^0 , X^0 – parametry jałowe transformatora; R , X – parametry całkowite toru elektrycznego; U^2 – napięcie fazowe wtórne transformatora; I^l – prąd łuku; U^l – napięcie łuku



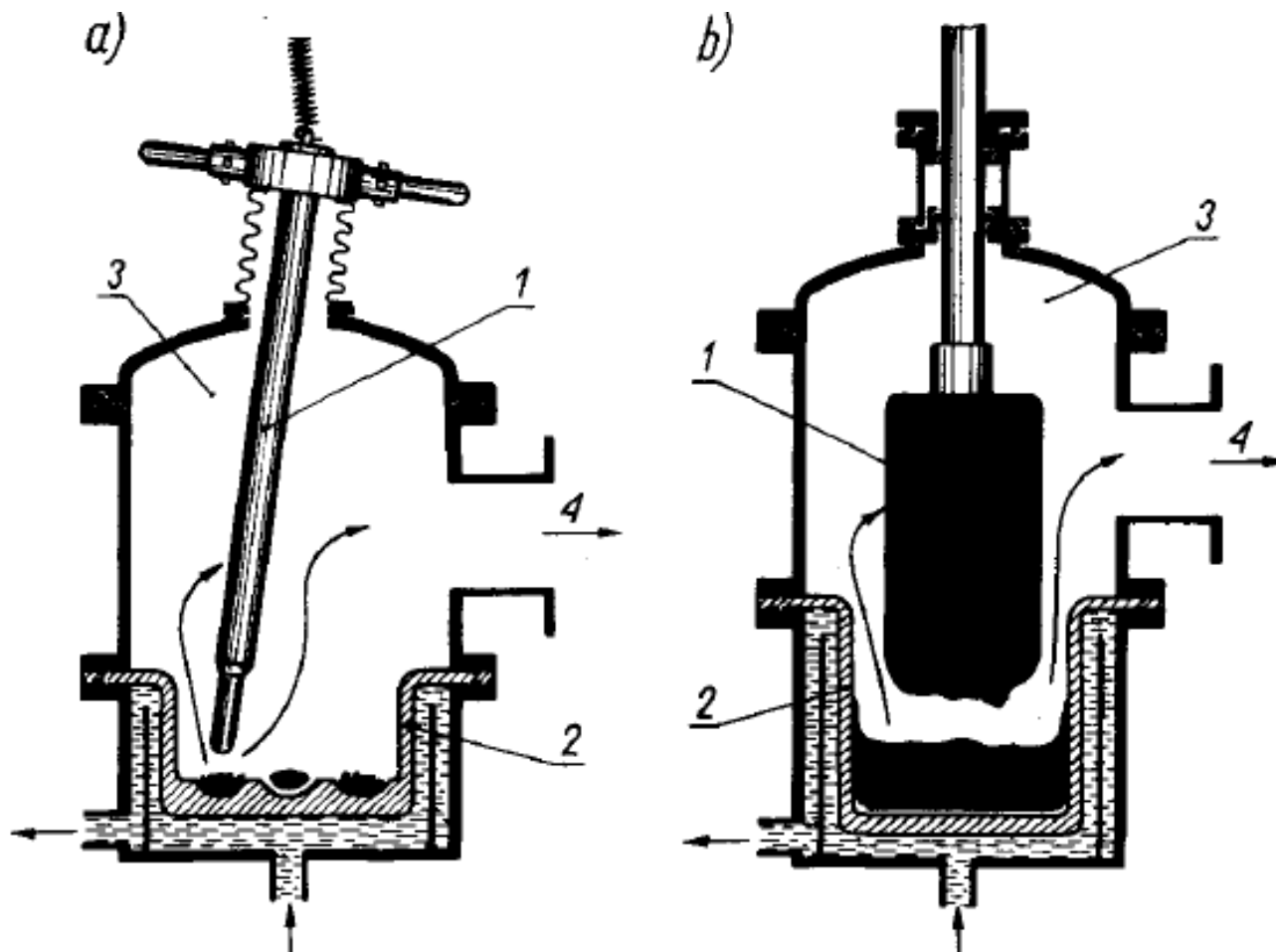
Układ do pomiaru parametrów toru wieloprądowego

- 1 – transformator piecowy,
- 2 – tor wieloprądowy,
- 3 – sonda wprowadzona do kąpeli stalowej



Schematy zasilania
jednoelektrodowych pieców łukowych
prądu stałego (DC-AF)

- 1 – transformator piecowy,
- 2a – prostownik sześciopulsowy,
- 2b – prostownik dwunastopulsowy,
- 3 – część giętka toru
wieloprądowego,
- 4 – piec jednoelektrodowy,
- 5 – dławik,
- 6 – filtr 5-tej harmoniczej,
- 7 – filtry 7, 11, i 13-tej harmoniczej



Schematy łukowych pieców próżniowych:

a) z elektrodą stałą; b) z elektrodą przetapianą

1 – katoda (elektroda stała w przypadku a) i przetapiana w przypadku b),

2 – anoda (kryształizator), 3 – komora próżniowa, 4 – do układu pomp próżniowych

PARAMETRY WEJŚCIOWEIlość energii doprowadzanej

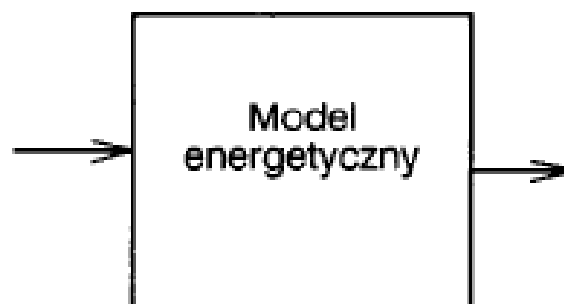
- elektrycznej
- wytwarzającej się w wyniku dostarczenia tlenu
- paliwowej

Straty energii

- gazy odlotowe
- woda chłodząca
- powierzchnia zewnętrzna
- przez promieniowanie z uniesionych elektrod
- w wyniku unoszenia i odchyłania pokrywy

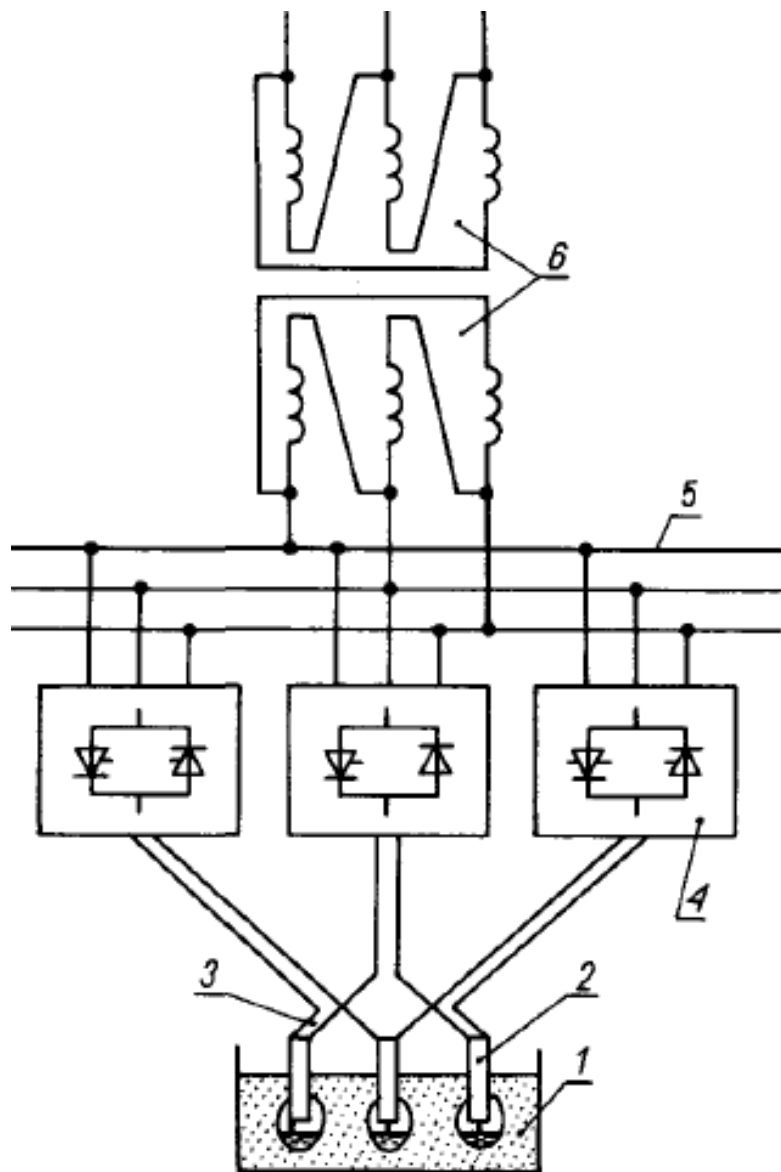
Materiały wsadowe

- rodzaj
- ilość
- czas wprowadzania do pieca
- ciepło właściwe i topienia

**PARAMETRY WYJŚCIOWE**

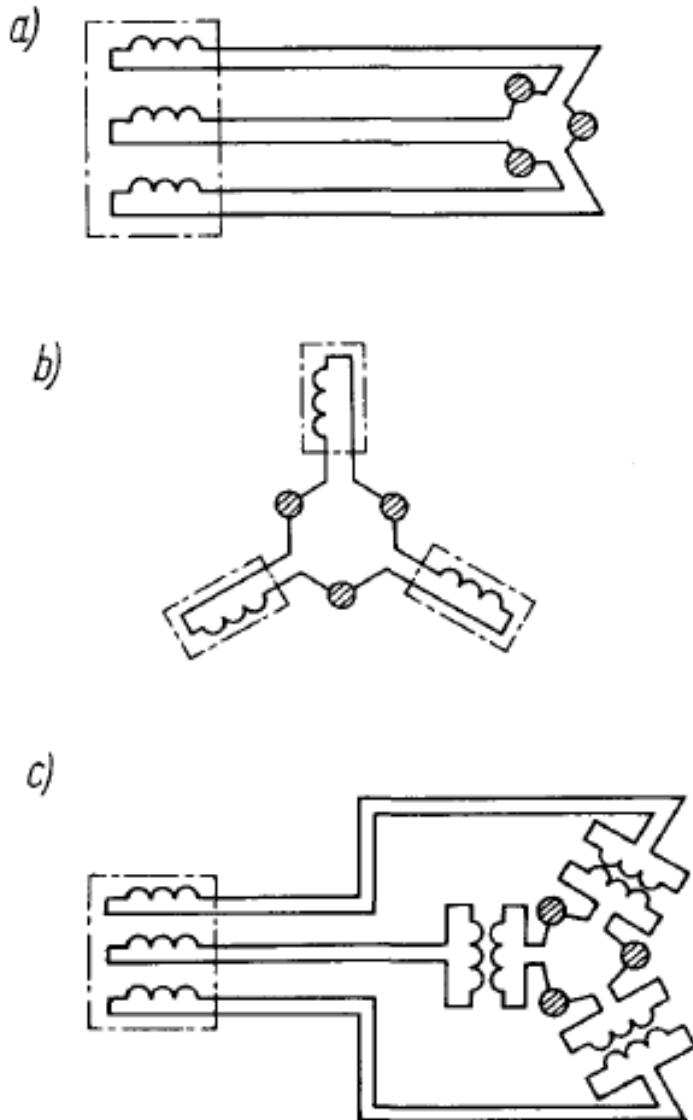
- $\Delta\tau_k$ – czas trwania k-tego odcinka procesu
- energia jaką należy dostarczyć w czasie $\Delta\tau_k$
- szacunkowa temperatura wsadu

Struktura modelu energetycznego



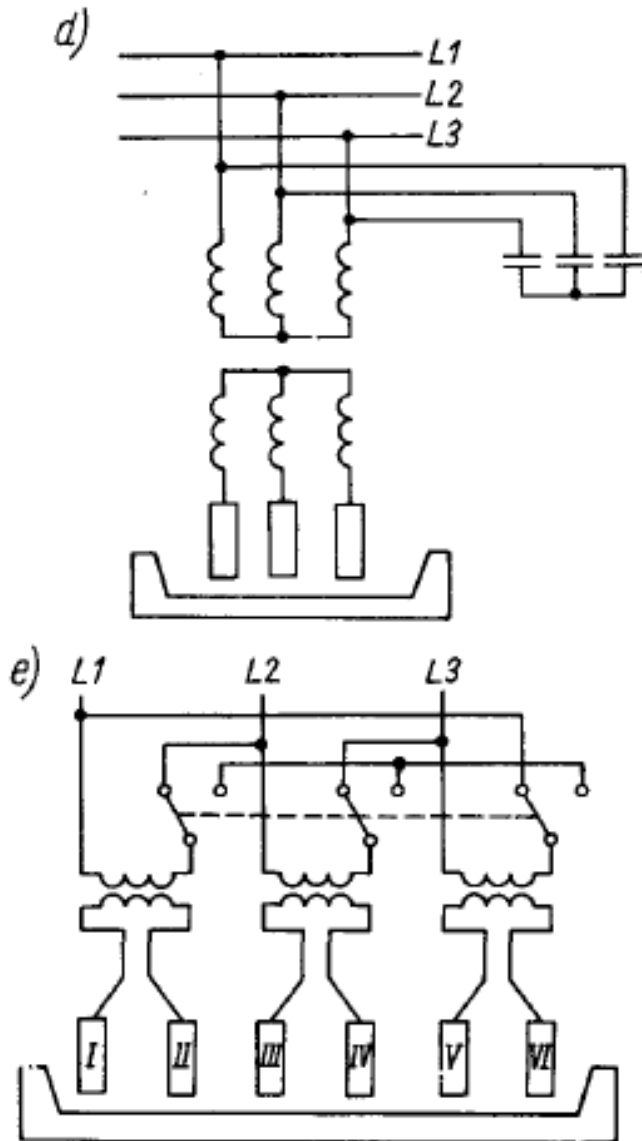
Obwód główny urządzenia łukowo-rezystancyjno-elektrodowego zasilanego prądem stałym lub o obniżonej częstotliwości

- 1 – wanna,
- 2 – elektroda,
- 3 – tor wielkoprądowy,
- 4 – przekształtnik napięcia,
- 5 – oszynowanie przekształtnika,
- 6 – transformator piecowy



Częściej spotykane układy transformator-piec

- a) z transformatorem trójfazowym i torem bifilarnym zamkniętym w trójkąt na elektrodach;
- b) z trzema transformatorami symetrycznie rozmieszczonymi wokół pieca, tor bifilarny zamknięty w trójkąt na elektrodach;
- c) z trzema transformatorami jednofazowymi o stałej przekładni symetrycznie rozmieszczonymi wokół pieca zasilanymi z regulacyjnego transformatora trójfazowego, z torem wielkopiędowym zamkniętym w trójkąt na elektrodach;
- d) z transformatorem trójfazowym i kompensacją mocy biernej;
- e) z trzema transformatorami jednofazowymi o regulowanym napięciu i torach wielkopiędowych bifilarnych



Częściej spotykane układy transformator-piec

- a) z transformatorem trójfazowym i torem bifilarnym zamkniętym w trójkąt na elektrodach;
- b) z trzema transformatorami symetrycznie rozmieszczonymi wokół pieca, tor bifilarny zamknięty w trójkąt na elektrodach;
- c) z trzema transformatorami jednofazowymi o stałej przekładni symetrycznie rozmieszczonymi wokół pieca zasilanymi z regulacyjnego transformatora trójfazowego, z torem wieloprądowym zamkniętym w trójkąt na elektrodach;
- d) z transformatorem trójfazowym i kompensacją mocy biernej;
- e) z trzema transformatorami jednofazowymi o regulowanym napięciu i torach wieloprądowych bifilarnych

Dziękuję za uwagę



mgr inż. Robert Czak

tel: 0048 603687444

mail: robert.czak@op.pl