

PRZEGLĄD TECHNICZNY

CZASOPISMO POŚWIĘCONE SPRAWOM TECHNIKI I PRZEMYSŁU

Nr. 5

WARSZAWA, 18 MARCA 1936 R.

Tom LXXV

TREŚĆ:

Szkic historyczny tłokowych maszyn parowych, prof. dr. inż. W. Chrzanowski.
 Obliczenie połączenia kołpaka parowego z płaszczem walczaka, inż. Z. Kłębowski.
 W sprawie stołecznej muzeologii gospodarczej, inż. J. Kączkowski.
 Racjonalny typ słupów i belek w stalowych budowlach przemysłowych, inż. P. Jakowlew.
 Konstrukcje stalowe na II Zjeździe Inżynierów Budowlanych, J. Słowiński.
 Feljeton gospodarczy
 Przegląd pism technicznych.
 Bibliografia.
 Kronika.

SOMMAIRE:

Esquisse historique de machines à vapeur, par M. le prof. W. Chrzanowski.
 Calcul du jonction de chapeau avec les tôles d'une chaudière cylindrique, par M. Z. Kłębowski.
 Sur la fondation de musée économique à Varsovie, par M. J. Kączkowski.
 Formes rationnelles des poteaux et des poutres pour les charpentes, par M. P. Jakowlew.
 Le II-me Congrès National du Bâtiment à Katowice, par M. J. Słowiński.
 Feuilleton économique.
 Revue documentaire.
 Bibliographie.
 Chronique.

Prof. dr. inż. W. CHRZANOWSKI

Szkic historyczny tłokowych maszyn parowych^{*)}

W dniu 19 stycznia 1936 r. upłynęło 200 lat od urodzenia Jamesa Watt'a, genialnego twórcy tłokowej maszyny parowej. Watt ujarzmił elementarne siły przyrody, odniósł nad nimi zwycięstwo, wyzyskując w swej maszynie parę wodną w sposób poprzednio nieznaną, a ekonomiczny pod względem rozchodu paliwa.

Tłokowa maszyna parowa, zastosowana w najróżniejszych dziedzinach przemysłu oraz w komunikacji lądowej i okrętowej, spowodowała przewrót w życiu narodów cywilizowanych. Dzięki rozpowszechnieniu jej rozwija się przemysł, powstają nowe jego gałęzie, wymiana towarów zostaje ułatwiona przez wprowadzenie odpowiedniej komunikacji; — liczne rzesze znajdują przez to utrzymanie, ogólna stopa życiowa ludności podnosi się znacznie.

Anglia zawdzięcza Watt'owi w znacznej mierze swój szybki rozwój przemysłowy i możliwość rozbudowy floty, co odegrało niemałą rolę w ugrun-



James Watt 1736 — 1819.

towaniu dominującego stanowiska Anglii wśród narodów.

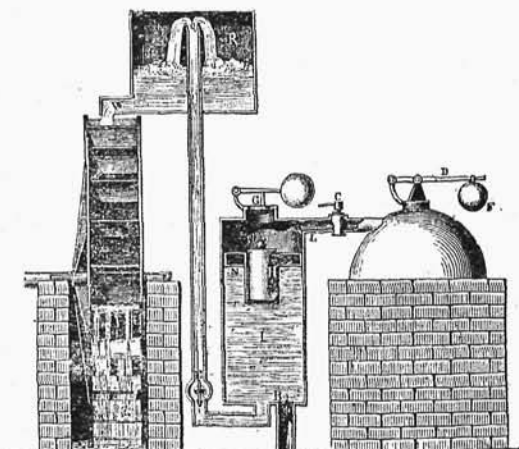
Naród angielski potrafił uczcić nieśmiertelne zasługi tego wielkiego wynalazcy i wytrwałego realizatora swych pomysłów, postawił go na równi z największymi wodzami, poetami i politykami i wystawił w opactwie westminsterskim pomnik z odpowiednim napisem.

Wielkość znaczenia twórczych pomysłów Watt'a i urzeczywistnionej przez niego tłokowej maszyny parowej uwydatnia się dopiero w całej pełni, gdy rozważy się wyniki działalności jego poprzedników, mianowicie francuza Papin'a, oraz anglików Savery'ego, Newcomen'a i Smeaton'a.

Denys Papin (1647—1712) uchodzi za właściwego wynalazcę maszyny parowej, wykazał bowiem pierwszy (w r. 1690) możliwość wytwarzania przy pomocy pary wodnej próżni pod tłokiem, znajdującym się w cylindrze, oraz możliwość wykonywania pracy mechanicznej przez działanie ciśnienia atmosferycznego na drugą stronę tłoka. Myśli tej nie urzeczywistnił jednak w praktyce, gdyż rzemieślnicy nie posiadali wówczas dostatecznej umiejętności w budowie części składowych takiej maszyny. Dążąc do osiągnięcia wyników realnych, Papin przedstawił w r. 1706 nową konstrukcję silnika parowego (rys. 2), wzorując się na pomysłach Savery'ego. Para, wytwarzana w oddzielnym kotle, działała na górną stronę tłoka, a po dolnej jego stronie znajdowała się woda. Pod

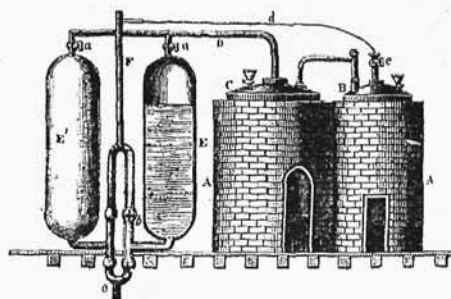
^{*)} Odczyt wygłoszony dn. 21 lutego r. b. w Stowarzyszeniu Techników Polskich w Warszawie.

wpływem prężności pary tłok przesunął się w cylindrze w dół i tłoczył wodę do zbiornika, z którego odpływała ona na łopatki koła wodnego. Po



Rys. 2. Schemat silnika Papin'a.

wykonaniu pracy wypuszczano parę nazewnątrz i wpuszczano wodę na dolną stronę cylindra, skutkiem czego tłok cofał się w górę. Był to więc pierwszy parowy silnik wydmuchowy. Z powodu braku należytego poparcia silnik Papin'a nie rozpo-



Rys. 3. Schemat maszyny Savery'ego.

wszechnił się wcale, pomimo że przyświecała mu myśl uzyskania użytecznego ruchu obrotowego.

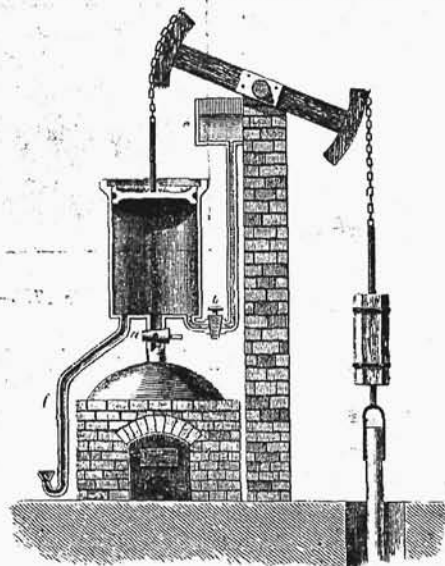
Do wykonywania pracy użytecznej, mianowicie do uruchamiania wodotrysków, zastosował po raz pierwszy parę wodną Thomas Savery, kapitan marynarki angielskiej. Maszyna jego, opatentowana w r. 1698, składała się (rys. 3) z dwóch kotłów B i C, z których pierwszy zasilany był wodą przez rurkę d, oraz dwóch zbiorników E i E'. Ostatnie były połączone z rurami do wody. Para, wpuszczana kolejno do zbiorników, tłoczyła wodę, a po skutecznieniu tego odcinano kurkiem a lub a' dopływ pary, która się skraplała, a zbiornik napełniał się świeżą wodą. Pomimo prawie ciągłej pracy maszyny w dostarczaniu wody, nie znalazła ona zastosowania przemysłowego, gdyż rozchód węgla był zbyt duży. Pomysł Savery'ego można uważać za prototyp pulsometru.

Szczęśliwszym wynalazcą był kowal Newcomen, który w r. 1705 wspólnie ze szklarzem Cawley'em opatentował silnik, oparty na pierwszych pomysłach Papin'a z r. 1690, stanowiący jednak równocześnie praktyczne ich rozwiązanie. Silnik ten (rys. 4), nazwany maszyną atmosferyczną, składał się z kotła i cylindra parowego, a jako charakterystyczną cechę konstrukcyjną posiadał wahacz, zapomocą którego uruchamiał pompę wo-

dną. Ciężary po obu stronach wahacza były wyważone. Para, wpuszczona kurkiem a do cylindra powodowała ruch tłoka parowego w górę, a trzonu pompy w dół. W pobliżu górnego zwrotnego położenia tłoka, dopływ pary do cylindra zostaje odcięty, a równocześnie zostaje otwarty dopływ zimnej wody przez kurek b, wywołując próżnię w cylindrze; wówczas tłok przesunął się w dół pod wpływem ciśnienia atmosferycznego, podnosząc równocześnie trzon pompy wraz z wodą w górę. Przy dojściu tłoka do dolnego położenia zwrotnego wypuszczano skroploną parę.

Maszyna atmosferyczna Newcomen'a, zaopatrzona w samoczynne sterowanie kurków, ulepszone konstrukcyjnie przez Smeaton'a, rozpowszechniła się bardzo (szczególniej do pompowania wody na kopalniach węgla) mimo nieekonomicznej pracy. Panowała ona przez blisko 70 lat jako jedyny ciepły silnik przemysłowy. Długoletni brak nowych pomysłów w tej dziedzinie można wytłumaczyć tylko nieznajomością własności ciepłych pary wodnej, których studjom nie poświęcili się wówczas fizycy. Kosztowna, nieekonomicznie pracująca maszyna atmosferyczna, nie wytwarzająca bezpośrednio użytecznego ruchu obrotowego, nie mogła jednak współzawodniczyć z nowym, na innych zasadach zbudowanym silnikiem cieplnym.

Silnikiem tym była tłokowa maszyna parowa, zbudowana przez Jamesa Watt'a, urodzonego w Greenock w pobliżu Glasgow. Będąc dzieckiem słabowitem, Watt późno zaczął uczęszczać do szkoły, a za czasów szkolnych mało obcował z kolegami, nie mogąc dorównać im pod względem siły fizycznej. Natomiast bardzo chętnie przebywał w czasie wolnym od nauki w warsztacie swego ojca, który dostarczał różnych części do statków. W warsztacie tym zaznajomił się z rozmaitymi materiałami i przyrządami i chętnie majstrował przy wytwarzaniu precyzyjnych przyrządów. Nie mogąc



Rys. 4. Schemat silnika Newcomena.

ze względów finansowych poświęcić się nauce, młody James w 16-tym roku życia rozpoczyna systematycznie kształcić się na mechanika precyzyj-

nego i w tym celu pracuje przez pewien czas w Glasgow i w Londynie. Praca ta przerywana jest z powodu niedomagań fizycznych. Mimo to skutkiem wrodzonych zdolności, Watt poznał swój zawód doskonale, tak że mając 20 lat postanowił usamodzielnąć się jako mechanik w mieście Glasgow. Zamiaru swego nie mógł jednak urzeczywistnić z powodu niemożności uzyskania zezwolenia ze strony cechu. Z trudności tych wybawił go uniwersytet w Glasgow, zezwalając na otwarcie warsztatu na terenie uniwersytetu i powierzając mu, w 22-gim roku życia, konserwację zbiorów modeli.

W charakterze mechanika uniwersyteckiego Watt wykonał w r. 1764 naprawę modelu maszyny *Newcomen'a*, przyczem poznał dokładnie słabe jej strony. Chcąc osiągnąć lepsze wyniki, postanowił najpierw zbadać własności pary wodnej zapomocą garnka *Papin'a*. Na podstawie gruntownych doświadczeń wyznaczył Watt temperaturę pary przy ciśnieniach powyżej jednej atmosfery, zestawiał otrzymane wyniki graficznie, odkładając ciśnienia na rzędnej, a przynależne temperatury na odciętej. Otrzymaną krzywą przedłużył i znalazł w ten sposób przybliżoną temperaturę pary przy ciśnieniach niższych od 1 atmosfery. Następnie wyznaczył objętość właściwą pary wodnej przy ciśnieniu 1 atmosfery, a w końcu ilość ciepła potrzebną do ogrzania wody do 100° C. Wyniki tych badań wskazały jasno na główne wady maszyny *Newcomen'a*, mianowicie: niedostateczną próżnię pod tłokiem, oziębianie tłoka powietrzem, oziębianie cylindra wtryskiwaną wodą.

Celem osiągnięcia lepszych wyników, Watt zbudował model cylindra, zamkniętego pokrywami, w którym para działała raz na górną, drugi raz na dolną stronę tłoka, natomiast skraplanie odbywało się w oddzielnym zbiorniku, kondensatorze. Doświadczenia, wykonane z tym przyrządem, w którym para o wyższym ciśnieniu (w przeciwstawieniu do maszyn atmosferycznych) poruszała tłok w czasie pracy użytecznej potwierdziły słuszność zapatrywań Watt'a. Urzeczywistnienie tych pomysłów w postaci silnika przemysłowego natrafiło jednakże w r. 1765 na ogromne trudności, szczególnie finansowe. Dopiero zawiązanie spółki z przemysłowcem dr. *Roebuck'iem* umożliwiło budowę maszyny o średnicy cylindra 190 mm, na podstawie której Watt ubiega się o ochronę patentową dla swych pomysłów. Otrzymuje patent Nr. 913 z dn. 5 stycznia 1769 r.

Cechy charakterystyczne tego słynnego patentu można streścić w następujących słowach: 1) w czasie ruchu maszyny cylinder musi być tak ciepły, jak para dopływająca; — osiągnąć to można przez izolację cylindra złemi przewodnikami ciepła lub ogrzewanie parą, oraz przez zapobieganie dostawianiu się do cylindra wody lub ciał zimniejszych od pary.

2) Skraplanie pary odbywa się w oddzielnych zbiornikach, zwanych kondensatorami.

3) Produkty kondensacji pompują oddzielne pompy, uruchamiane maszyną lub w inny sposób.

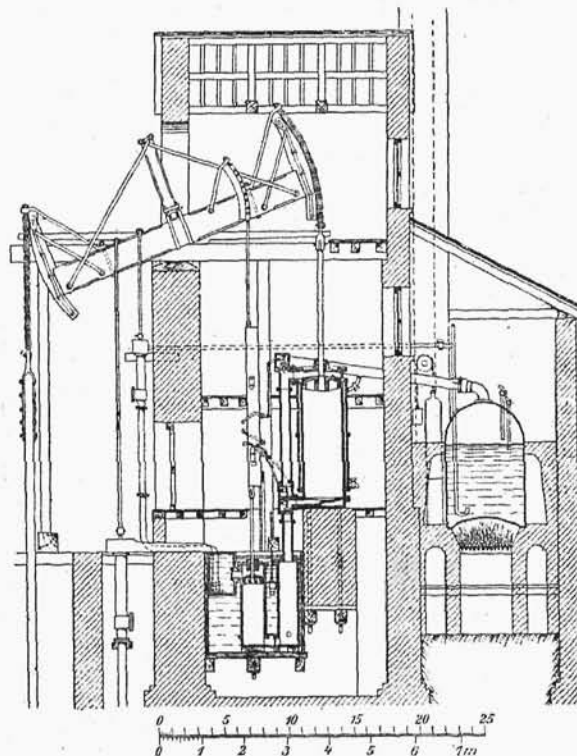
4) Prężność pary ma służyć do poruszania tłoków lub części je zastępujących.

W razie braku wody do skraplania pary, maszyna może pracować z wydmuchem.

Zasady powyższe, świadczące o głębokim wnikięciu w istotę maszyny parowej, są ważne po dziś dzień.

Zbudowana w r. 1769 większa maszyna (średnica cylindra 458 mm, skok 1520 mm) nie dała pomyslnych wyników. Wykonanie jej nie było zadowalające, głównie z powodu braku odpowiednich rzemieślników i obrabiarek. Tłok i kondensator powierzchniowy okazały się tak nieszczelne, że uzyskana moc była niewielka. Watt pracuje przez kilka lat niezmordowanie nad ulepszeniem swej maszyny. W tym czasie powstają inne trudności, mianowicie finansowe. W r. 1774, po ogłoszeniu bankructwa dr. *Roebuck'a*, Watt zawiązuje spółkę z przedsiębiorczym przemysłowcem *Matthew Boulton'em*, który zabrał się do dzieła z całkowitem oddaniem: zaryzykował wielki kapitał, zbudował nowe warsztaty w Soho pod Birmingham, wyposażył je w najlepsze z istniejących wówczas obrabiarek, oraz postarał się o możliwie najlepszych rzemieślników. Jedynie dzięki takiemu poparciu osiągnięto, po przewyciężeniu licznych trudności wykonawczych (w szczególności z uszczelnieniem części ruchomych) w stosunkowo krótkim czasie bardzo dodatnie wyniki. W r. 1790 pracowały już na kopalniach w księstwie Cornwall wyłącznie maszyny Watt'a.

Jedno z pierwszych wykonan ilustruje rys. 5. Jest to maszyna jednostronnie działająca. Zawór,



Rys. 5. Schemat maszyny Watt'a jednostronnie działającej.

umieszczony w górnej części cylindra, służy do dławienia pary dolotowej; z umieszczonych w dole cylindra zaworów górny służy do wpuszczania pa-

ry, a dolny do łączenia z kondensatorem dolnej części cylindra. Maszyna wykonywa pracę użyteczną przy ruchu tłoka z góry na dół. Wówczas na górną część tłoka działa para dolotowa, a na dolną — ciśnienie panujące w skraplaczu. Przy ruchu tłoka w górę działa jednakowe ciśnienie pary na obie strony tłoka, poruszanego ciężarem trzonu pompy. Pompa powietrzna pompuje skropliny do zbiornika, a druga pompa, umieszczona przy ścianie, wciąga je do kotła. W danym wypadku zastosowano kondensator powierzchniowy, który Watt zastąpił później kondensatorem natryskowym.

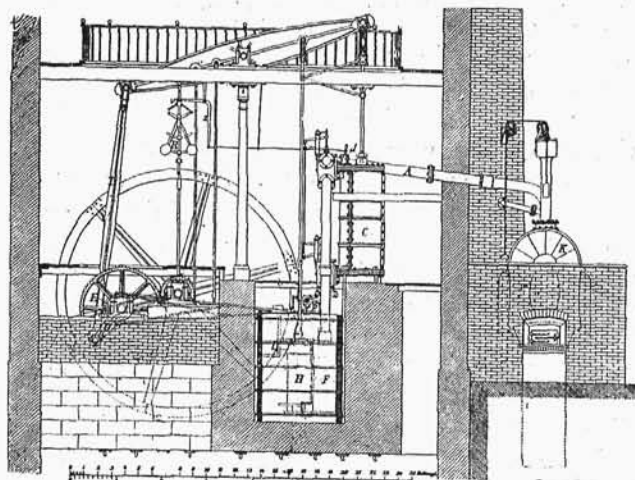
Maszyny Watta służyły w pierwszych latach wyłącznie do pompowania wody na kopalniach. To nie zadowalało przedsiębiorczego i ambitnego Boulton'a. Pragnął on stworzyć typ maszyny, która mogłaby napędzać bezpośrednio fabryki, utrzymywane wówczas w ruchu zapomocą kół wodnych lub napędu konnego. Wytrwałe dążenia Boulton'a skierowały budowę tłokowych maszyn parowych na inne tory. Do zamiany ruchu posuwistego na ruch obrotowy Watt zastosował wówczas znany od dawna mechanizm korbowy, umieszczając jednocześnie na wale koło zamachowe celem osiągnięcia równomierniejszego biegu maszyny. Na przeszkodzie stanął mu wówczas (r. 1781) uzyskany przez Washbrough'a patent na korbę, co zmusiło go do opatentowania i stosowania innych mechanizmów zamieniających ruch posuwisty na obrotowy, aż do wygaśnięcia w r. 1794 patentu na korbę. Umysł Watt'a pracuje niezmordowanie nad różnymi ulepszeniami maszyny. W r. 1782 uzyskuje on patenty na maszynę pracującą z ekspansją i na obustronnie działającą maszynę, a w r. 1784 — patent na równoległe prowadzenie końca drąga tłokowego zapomocą kierowniczego równoległoboku, co było jego najmilszym wynalazkiem. Również zastosował on odśrodkowy regulator ciężarowy, działający na klapę dławiacą parę dolotową.

Równoległe z pracą wynalazczą Watt przeprowadzał niezmordowanie liczne ulepszenia konstrukcyjne oraz troszczył się o możliwie najlepsze wykonanie warsztatowe. Późniejszą budowę (1800—1810) jego maszyny obustronnie działającej ze stawidłem zaworowym przedstawia rys. 6. Po stronie cylindra widzimy równoległobok Watt'a, a po drugiej stronie wahacza korbówód i korbę. Moc maszyny wynosiła 50 KM, średnica cylindra — 807 mm, skok tłoka — 1830 mm, liczba obrotów — 38 obr/min, średnie ciśnienie indykowane — 0,613 at, rozchód węgla — ok. 4,5 kg/KMh.

W r. 1800 wygaśł główny patent Watt'a. Wtedy wycofał się on z fabryki i zamieszkał we własnej willi w pobliżu Heathfield. Mając zapewniony byt materialny, wybudował własny warsztat i zajmował się wynalazkami. Umarł w 84 roku życia, dn. 19 sierpnia 1819 r.

W tych krótkich słowach naszkicowane wyniki działalności Watt'a dają choć małe poglądy na twórczość tego wyjątkowego inżyniera. Poprzednicy Watt'a byli wynalazcami silników, działających przy pomocy pary wodnej, Watt natomiast dopiero

stworzył tłokową maszynę parową. Osiągnął w krótkim czasie wspaniałe wyniki jedynie dzięki naukowemu badaniu zjawisk przyrody, dzięki umiejętnemu, bezpośredniemu zastosowaniu wyników naukowych w budowie maszyn, oraz dzięki wydatnemu poparciu finansowemu i moralnemu przez przedsiębiorczego Boulton'a.



Rys. 6. Schemat maszyny Watt'a obustronnie działającej

Po r. 1800 rozpoczyna się rozwój tłokowych maszyn parowych, nie skrzepowany ochroną patentową. Powstają nowe fabryki silników parowych, a liczni inżynierowie zajmują się ich budową, dążąc do usunięcia słabych stron maszyny Watt'a.

Najdotkliwszymi z nich były: duży rozchód węgla, znaczne zapotrzebowanie miejsca i wysoka cena, spowodowane niskim ciśnieniem pary dolotowej i małą liczbą obrotów maszyny. Ulepszenia w tym kierunku trwały długi okres czasu; największe zasługi w tej dziedzinie położyli na początku wieku XIX-go amerykańsin Evans, który stosował ciśnienia 7—10 atn, oraz Anglicy Trevithick i Vivian. W tym samym czasie około r. 1804 powstała też dwucylindrowa obustronnie działająca maszyna Anglika Woolf'a; — para świeża napełniała w czasie całego skoku cylinder małej średnicy, a w drugim cylindrze, znacznie większej średnicy, para działała tylko przez rozprężanie, co zmniejszyło znacznie rozchód węgla na 1 KMh.

Inne pomysły dążyły do ulepszenia mechanizmów sterujących. Około r. 1818 rozpowszechniła się budowa suwaka płaskiego (patent Murray'a z r. 1802), Hornblower wynalazł około r. 1800 zawory dwusiedzeniowe, które Woolf stosował w postaci zaworów dzwonowych, a zatem częściowo odciążonych. Równocześnie ulepszono mechanizmy uruchamiające zawory, przyczem zamykanie skuteczniały ciężarki. Już około r. 1836 stosował Farcof suwaki podwójne, umożliwiające ręczną zmianę napełnienia w czasie ruchu silnika.

Zewnętrzne kształty maszyny uległy też pewnym zmianom. Jako najważniejszą z nich można wymienić ułożenie na słupach żeliwnych łożyska, w którym spoczywał wahacz. W r. 1807 powstał też stojący układ bez wahacza, stosowany przez inż. Maudslay'a. Wał znajdował się tutaj pod cylindrem, ułożonym na ramie żeliwnej, a otrzymy-

wał napęd bezpośrednio zapomocą korbowa. Jako trzecią odmianę można przytoczyć układ leżący, opatentowany w r. 1792 we Francji przez inż. *Perrier*; — maszyna ta posiadała wodzik wraz z prowadnicą. Typem najwięcej rozpowszechnionym pozostały przez długi okres maszyny z wahaczem, natomiast typ konstrukcyjnie lepszy *Maudslay'a* stosowany był tylko w mniejszych maszynach, a układ leżący był bardzo rzadko stosowany. Cechą charakterystyczną późniejszych układów była dążność nadania maszynie zewnętrznych kształtów architektonicznych. Wyplenienie tych nieusprawiedliwionych, dla rozwoju maszyny szkodliwych naleciałości dokonano dopiero w drugiej połowie XIX-go wieku.

Tłokowa maszyna parowa znalazła w krótkim czasie szerokie zastosowanie jako silnik służący do napędu pomp na kopalniach i w miastach, do napędu fabryk, wyciągów kopalnianych, dmuchaw hutniczych, młotów i t. p. Większą rolę w życiu handlowem, cywilizacyjnym i kulturalnym odegrała ona jednak jako silnik, służący do napędu środków komunikacyjnych. Powstanie kolei żelaznej zawdzięczamy *Stephenson'owi*, który zdobył nagrodę za swój parowóz, wypróbowany w r. 1829 na drodze żelaznej z Liverpoolu do Manchesteru. Parowozy zostały zaopatrzone przez *Stephenson'a* w nawrotne stawidło jarzmowe, wynalezione w r. 1843 przez *Howe'a*. Koleje żelazne rozpowszechniły się w Europie i w Ameryce bardzo szybko, bo już w r. 1850 sieć kolejowa wynosiła blisko 40 000 km.

Nie mniejsze znaczenie dla rozwoju gospodarczego narodów miało zastosowanie maszyny parowej do napędu statków i okrętów. Pierwsze zadowalające wyniki na tem polu osiągnął w r. 1807 amerykańnik *Fulton*. Budowa statków rzecznych, napędzanych maszynami parowymi, rozpowszechnia się stopniowo we wszystkich państwach, a już w kwietniu r. 1838 okręt „*Great Western*” przepłynął w ciągu 15 dni drogę z Anglii do Ameryki. W owym czasie przyczynili się najwięcej do rozwoju parowych maszyn okrętowych amerykańnik *Robert Stevens* i Anglik *John Penn* (stawidło jarzmowe z r. 1838).

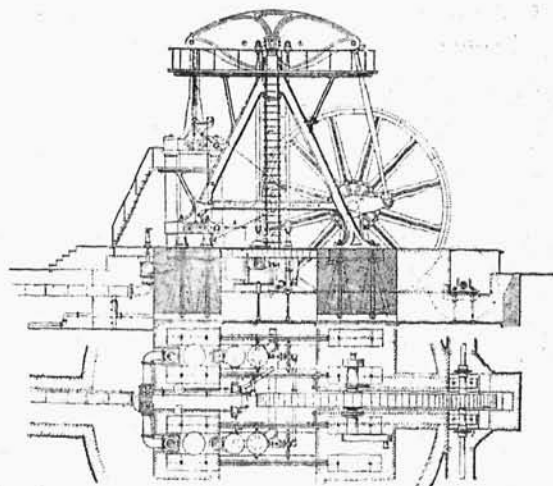
Równolegle z udoskonaleniem budowy tłokowych maszyn parowych postępowały badania naukowe w tej dziedzinie. Z badaczy wymienić należy przede wszystkim tych, którzy położyli podwaliny pod naukę termodynamiki teoretycznej, więc *Sadi Carnot* (1824 r.), *Régnauld* (1847 r.), *Robert Mayer*, *Joule*, *Helmholtz*, *Rankin*, *Clausius*, *Thomson*. Zasady przez nich ustalone zastosowali do maszyn parowych *Redtenbacher*, *Grashof*, *Hirn*, *Zeuner*, *Weissbach*, *Fliegner*. Z termodynamiki teoretycznej powstaje termodynamika techniczna.

Ogłaszane prace naukowe dotyczyły także poszczególnych części maszyny. Jako najważniejsze z nich wymienić należy z początku drugiej połowy XIX-go wieku publikacje o wykresach stawidłowych, ogłoszone przez profesorów *Reuleaux*, *Mueller'a* i *Zeuner'a*.

Dalsze udoskonalenie tłokowej maszyny parowej polega na wprowadzeniu około r. 1850 t. zw.

maszyn precyzyjnych, w których regulator nie dławiał pary dolotowej zapomocą kłapy, lecz działał bezpośrednio na stawidło, zmieniając samoczynnie wielkość napełnienia, zależnie od obciążenia silnika. Skutkiem tego maszyna rozchodowała znacznie mniej pary.

W dziedzinie precyzyjnej i samoczynnej regulacji tłokowych maszyn parowych przełomową była działalność amerykańnika *George'a Corliss'a*. Wprowadził on w r. 1848 po raz pierwszy działanie regulatora na stawidło wychwytowe, a w roku następnym zbudował nowe stawidło wewnętrzne z suwakami kruczkowymi. Po ok. 80 latach od czasu podstawowego patentu *Watt'a*, genialny ten konstruktor wykonał nienaganny pod względem teoretycznym ustrój maszyny parowej, odznaczający się małą przestrzenią i powierzchnią szkodliwą, prostą drogą pary pomiędzy stawidłami wewnętrznymi a cylindrem, oraz zastosował większą prędkość tłokową i wyższe ciśnienie pary dolotowej. Dzięki temu osiągnął bardzo dodatnie wyniki, gdyż maszyny jego, odznaczające się spokojnym i równomiernym biegiem, rozchodowały tylko ok. 0,75 kg węgla na 1 KM_h. Skutkiem tego znalazły one duże rozpowszechnienie w Ameryce, zwłaszcza że były dostarczane w krótkim czasie. *Corliss* wprowadził budowę pewnych określonych typów maszyn, których poszczególne części wykonywał w większej ilości na skład. Dzięki temu również cena maszyny przy stosowaniu nowych metod obróbki na najlepszych obrabiarkach nie była wysoka. Typ normalny maszyny wysyłał *Corliss* z fabryki w ciągu kilku godzin. Śmiałość konstruktorska i umiejętność budowy uwydatniła się dobitnie w dwucylindrowej maszynie stojącej z wahaczem o mocy największej 2000 KM, którą zbudował *Corliss* w ciągu 10 miesięcy w swej fabryce w

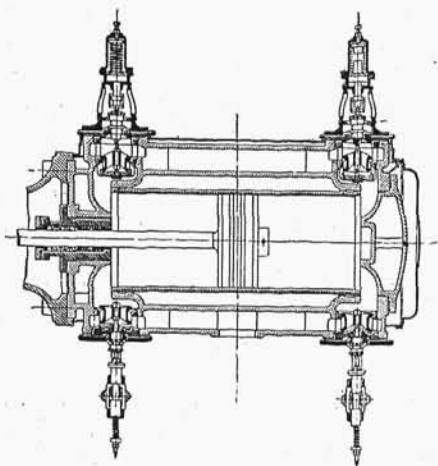


Rys. 7. Maszyna parowa *Corliss'a*.

Providence i ustawił na wystawie w Filadelfji w r. 1876 (rys. 7). Średnica każdego cylindra wynosiła 1016 mm, skok tłoka 3050 mm, liczba obrotów 36 obr/min, czyli średnia prędkość tłoka 3,66 m/sek. Na początku drugiej połowy XIX-go wieku powstają też różne ulepszenia suwaka płaskiego, mianowicie: suwak *Trick'a* (r. 1855), suwak *Penn'a*,

suwaki podwójne *Meyer'a* (r. 1842) i *Rider'a* (r. 1860), oraz suwak tłokowy. Znaczenie ostatniego wzrosło po zastosowaniu ok. r. 1875 regulatora osiowego (zbudowanego ok. r. 1862), umożliwiającego precyzyjną regulację silnika przy wyjątkowo prostym, a bezwzględnie niezawodnym napędzie regulatora.

W międzyczasie budowa silników *Corliss'a* przeszła z Ameryki do Europy, gdzie rozpowszechniła się przeważnie na Zachodzie. Natomiast w Niem-



Rys. 8. Przekrój maszyny parowej *Brown'a*.

zech i Szwajcarii zaczął opanowywać rynek zbytu nowy typ precyzyjnej maszyny parowej, stworzony w fabryce *Sulzera* w Szwajcarii przez wybitnego konstruktora angielskiego *Charles Brown'a*. Typem tym była leżąca maszyna zaworowa, wystawiona w Paryżu w r. 1867 (rys. 8). Posiadała ona cztery dwusiedzeniowe zawory rurowe, znacznie więcej odciążone od dzwonowych, — zawory wlotowe umieszczone w górnej, a wylotowe w dolnej części cylindra. Zawory wlotowe były wyposażone w stawidła wychwytowe, nastawiane samoczynnie przez regulator. Maszyna *Sulzera* posiadała już ramę bagnetową z prowadnicą.

Współzawodnictwo z maszynami *Corliss'a* pod względem rozchodu pary i kosztów budowy przyczyniło się do licznych ulepszeń maszyn zaworowych. Dotyczyły one przeważnie mechanizmów stawidłowych, z których inż. *Collmann* wprowadził w r. 1876 stawidła biegunowe. Był to okres blisko 25-letni, w którym każda fabryka, celem sprostania konkurencji i utrzymania zamówienia, starała się posiadać własne stawidło, chronione patentem. Jak grzyby po deszczu powstawały najróżnorodniejsze, przeważnie bardzo zawiłe i bardzo kosztowne mechanizmy stawidłowe, które oczywiście zastąpiono, niestety po zbyt długim czasie, mechanizmami możliwie prostymi. Naogół przypisywano w ostatnim 25-leciu ubiegłego wieku, w którym to czasie wprowadzono też odśrodkowy regulator sprężynowy, zbyt duże znaczenie wykresowi inżyniera, zdjętemu z maszyny, a zapomniano o tem, że główne straty powoduje skraplanie wstępne, powstające wskutek wymiany ciepła pomiędzy parą a ściankami cylindra.

Celem zmniejszenia rozchodu pary, a zatem paliwa należało stosować kilkakrotne jej rozprę-

żanie. Podział prężności pary na kilka cylindrów zmniejsza znacznie skraplanie wstępne, gdyż ścianki cylindra wysokoprężnego posiadają znacznie wyższą temperaturę średnią, a równocześnie zmniejszają się straty nieszczelności. Na drogę daleko posuniętej ekspansji pary w maszynach o kilkakrotnym rozprężaniu wkroczone stosunkowo późno. Około r. 1860 pracowało już szeregi maszyn typu *Woolf'a* o podwójnym rozprężeniu pary, jednakże z bardzo dużym (60—70%) napełnieniem cylindra wysokoprężnego; — największym ich przeciwnikiem był *Corliss*. Maszyny układu sprężonego wprowadzono najpierw na okrętach angielskich, a dopiero ok. 1880 r. rozpowszechniły się one wraz z układem posobnym jako maszyny łądowe.

Inny środek, służący nietylko do zmniejszenia skraplania wstępnego, lecz także do zwiększenia spadku adyabatycznego entalpii, mianowicie para przegrzana została w maszynach parowych jeszcze znacznie później wprowadzona. Pomimo wybitnych prac naukowych alzaczka *Gustawa Hirn'a*, ogłoszonych w r. 1856, w których uczony ten wyświetlił na podstawie własnych doświadczeń własności pary przegrzanej i wykazał jej dodatnie strony, zachowywano wielką powściągliwość w stosowaniu pary przegrzanej. Oprócz trudności budowy trwałych przegrzewaczy, stały na przeszkodzie brak odpowiednich dławnic i odpowiedniego smaru cylindrowego. Rozpowszechnienie silników pracujących parą przegrzaną rozpoczyna się dopiero po r. 1890. Nawet na początku wieku bieżącego, w czasie, w którym tłokowa maszyna święciła swe największe triumfy, stosowano przeważnie tylko małe przegrzanie pary, natomiast przy wielkiej mocy — potrójne rozprężanie pary w silnikach leżących lub stojących.

Na początku bieżącego wieku dokonał się też wreszcie gruntowny przewrót w budowie mechanizmów stawideł zaworowych. Połączenie regulatora osiowego ze stawidłem biegunowym przeprowadził dr. inż. *Proell* w r. 1890, w następnym roku inż. *Collmann* zastosował do napędu wentyli w Brnie (Czechosłowacja) taki mechanizm krzywiznowy, odznaczający się dużą prostotą. Zasadę rozpowszechnienia stawidła krzywiznowego w połączeniu z regulatorem osiowym posiada jednakże inż. *Lentz*, który ok. r. 1900 skonstruował w Brnie (Czechosłowacja) taki mechanizm wyjątkowej prostoty. Stawidła krzywiznowe różnych konstrukcji są w maszynach zaworowych do dziś dnia prawie wyłącznie stosowane, gdyż odznaczają się prostą i taną budową, niezawodnością w ruchu, łatwą obsługą i taną wymianą.

W tym okresie powstaje też prawidłowa konstrukcja cylindra i dławnic na parę wysoko przegrzaną. Równocześnie inne konstrukcje dążą do poprawienia istoty tłokowej maszyny parowej; wymienimy tu belgijską maszynę *Van den Kerchove'a* (r. 1900) i maszynę przelotową prof. *Stumpfa* z Charlottenburga (r. 1905). Pierwsza osiągnęła bardzo dodatnie wyniki pod względem rozchodu pary, dzięki wydatnemu zmniejszeniu przestrzeni i powierzchni szkodliwych; uzyskano to przez umiesz-

czenie zaworów w łbicach cylindra, ogrzewanych płynącą parą dolotową, oraz dzięki zastosowaniu szczelnych zaworów tłokowych i większych prędkości tłoka. Prof. *Stumpf* uzyskał natomiast w swej jednocyndrowej, a zatem prostej i taniej maszynie, bardzo mały rozchód pary, zapobiegając skraplaniu wstępnemu środkami zastosowanymi przez *Kerchovę*, a zwiększając jednocześnie sprawność termodynamiczną części niskoprężnej przez zastąpienie zaworów wylotowych szczelinami o bardzo dużych przekrojach; — pewien korzystny wpływ wywarł także jednokierunkowy przepływ pary.

W czasie od r. 1900 do 1914 wprowadzono także w maszynach parowych, stosowanych w specjalnych dziedzinach, parę przegrzaną i poważne ulepszenia budowy. Wymienię lokomobile rolnicze i przemysłowe, parowozy, nawrotne maszyny walcownicze i wyciągowe. Ostatnie, stosowane przeważnie w głębokich szybach, wyposażono w samoczynną regulację rozprężania pary oraz samoczynną regulację w czasie całego biegu maszyny.

Wszystkie ulepszenia, dokonane także w wieku bieżącym, nie mogły zapobiec wyparciu tłokowych maszyn parowych jako silników dużej i średniej mocy. Proces ten rozpoczyna się w r. 1905 i postępuje coraz szybciej. W wielkich siłowniach elektrycznych i na okrętach morskich ustawia się przeważnie turbiny parowe, a czasem także silniki *Diesel'a*, a w siłowniach hut i kopalni — obustronnie działające maszyny gazowe lub turbiny parowe; — w siłowniach średniej mocy tłokowa maszyna parowa współzawodniczy z silnikiem *Diesel'a* i często z tej walki wychodzi zwycięsko.

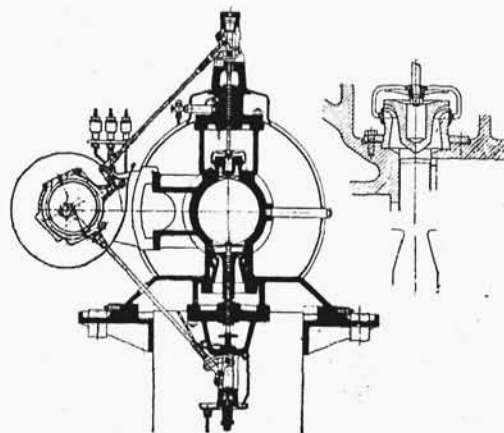
Tłokowa maszyna parowa posiada dwa środki, które mogą ułatwić jej współzawodnictwo, mianowicie: znaczne podwyższenie ciśnienia pary dolotowej i liczby obrotów. Pierwszy z tych środków miał też służyć w okresie po r. 1926, kiedy zaczęto stosować bardzo wysokie ciśnienie dolotowe, (choć nie zawsze było to właściwe) do zachowania rynku zbyt dla tłokowej maszyny parowej jako silnika mocy aż do ok. 6000 KM, w szczególności jako silnika przeciwpężnego. Turbina parowa posiadała bowiem wówczas w swej części wysokoprężnej, zwłaszcza przy wysokim ciśnieniu pary dolotowej i średniej mocy, dość niską sprawność termodynamiczną. Zbudowano wówczas kilka tłokowych maszyn parowych na bardzo wysokie ciśnienia, n. p. fabryka *Borsig'a* w Berlinie ustawiła w Ameryce w r. 1930 dwie stojące maszyny o potrójnym rozprężaniu pary po 6000 KMe dla pary dolotowej o ciśnieniu 100 atn. i 425°C , przeciwpężności 4,5 atn i $n = 225$ obr./min. W międzyczasie sprawność części wysokoprężnej turbin parowych została przez zmianę budowy znacznie podwyższona, równocześnie także sprawność turbin mniejszej mocy poważnie się poprawiła, a cena ich została obniżona przez stosowanie, obecnie już zupełnie niezawodnie działającej, przekładni zębatej.

W chwili obecnej tłokowa maszyna parowa może jako silnik lądowy współzawodniczyć z turbiną parową do mocy najwyżej 500 kW, gdyż koszty jej budowy są znacznie wyższe. Pod względem

rozchodu pary jest ona wprawdzie, zwłaszcza przy mniejszych obciążeniach, a zatem przy ruchu o zmiennym obciążeniu, korzystniejsza od turbiny parowej. Chcąc utrzymać obecny stan posiadania, tłokowa maszyna parowa musi być wciąż ulepszana. Jako postęp z ostatnich lat wymienimy maszynę *Gutermuth - Pierwsza Brneńska* (rys. 9), w której przy ekonomicznej pracy obniżono cenę bardzo poważnie przez znaczne podwyższenie liczby obrotów maszyny zaworowej (do 400 obr./min); — ostatnie zostało umożliwione dzięki zastosowaniu działania dyfuzorowego pary w gniazdach organów sterujących. Oprócz silnika lądowego mniejszej mocy, na którym to polu współzawodniczy z silnikiem *Diesel'a*, tłokowa maszyna parowa zachowała prawie całkowicie swój stan posiadania jako silnik do napędu statków rzecznych i parowozów. Elektryfikacja sieci kolejowej dalekobieżnej jest bowiem bardzo kosztowna, a eksploatacja przy braku wielkich i rozrzuconych po kraju sił wodnych, zbyt kosztowna. Nawiasem nadmieniam, że w Polsce tylko ok. 2% mocy elektrowni wytwarza się zapomocą siły wodnej. Komunikacja kolejowa zapomocą silników spalinyowych nie wyszła jeszcze z okresu próbnego, a nie wiadomo, czy w większości krajów wytrzyma ona konkurencję z napędem parowym.

Jeżeli rzucimy okiem wstecz na przeszło półtorowiekową historję tłokowych maszyn parowych, to musimy stwierdzić dwa fakty:

1) Uczni różnych państw przyczynili się do zbadań naukowych podstaw tłokowej maszyny parowej, natomiast przeważnie Anglicy rozwiązywali nowe zagadnienia techniczne z tej dziedziny z podziwu godnym zmysłem praktycznym i z niezrównaną przedsiębiorczością.



Rys. 9. Przekrój maszyny parowej *Gutermutha*.

2) Obecna budowa maszyny parowej, odznaczająca się prostotą i celowością, została stworzona dopiero zbyt późno, bo na początku wieku bieżącego. Przypisać to należy postępowaniu fabryk maszyn parowych, które zbyt mało wnikały w istotę zagadnienia pod względem termodynamicznym i konstrukcyjnym, a zwracały główną uwagę, ze względów konkurencyjnych, na posiadanie własnych patentów.

Patenty nie mogą decydować o powodzeniu na

dłuższą metę. Cóż utrzymało się z tej wielkiej liczby patentów na stawidła? Suwak tłokowy, zawór tłokowy, zawór jednosiedzeniowy i dwusiedzeniowy rurowy, a z mechanizmów stawidłowych tylko bezpośredni napęd mimośrodem, stawidła krzywiznowe oraz najprostsze stawidła nawrotne. Można nawet wyrazić przypuszczenie, że dwusiedzeniowy zawór rurowy zniknie w budowie nowych tłokowych maszyn parowych. Zachowanie stanu posiadania na rynku zbytu przez tłokową maszynę parową, a może nawet rozszerzenie tego

stanu posiadania, czyli rozwój dalszy tych silników wymaga bowiem umiejętnego wyzyskania wysokich ciśnień pary przy jednoczesnym bardzo znacznym powiększeniu liczby obrotów.

LITERATURA:

- 1) Reuleaux — „Geschichte der Dampfmaschine”, skąd zaczerpnięto rys. 2, 3, 4.
- 2) Radinger „Dampfmaschinen” — skąd zaczerpnięto rys. 7.
- 3) Matschoss „Geschichte der Dampfmaschine”, skąd zaczerpnięto rys. 5, 6, 8.

Inż. Z. KLĘBOWSKI

Obliczenie połączenia kołpaka parowego z płaszczem walczaka

Ogólnie rozpowszechnione jest mniemanie, że nity (po zanitowaniu) nie mogą być poddane rozciąganiu, lecz jedynie ścinaniu.

Ponieważ w połączeniu omawianym mamy do czynienia z nitami, wybitnie narażonymi na napięcia rozciągające, przeto nieodzowne jest na wstępie rzucenie światła na zjawiska, w takich nitach zachodzące.

Brak zdolności przenoszenia napięć rozciągających ma polegać na tem, że materiał szyjki nita przy zastyganiu (od temp. około 800°C do około 20°C), przekracza granicę plastyczności, wobec czego wszelkie dodatkowe obciążenie nita będzie już dalszem przekraczaniem granicy plastyczności, sprzecznem z przyjęciem w innych miejscach tej samej konstrukcji dość niskiego dopuszczalnego naprężenia.

Jest to pogląd niczem nieuzasadniony, chyba jedynie swą wieloletnią tradycją. Przesąd ten, wprowadzający zamęt w pojęciu roli, jaką spełnia nit, należy zwalczać; obalamuca on młodych, wchodzących w życie konstruktorów, budujących swe wyobrażenia na ustalonych pojęciach starszych doświadczonych inżynierów*).

Przedewszystkiem przekroczenie „granicy plastyczności” przez materiał nita, zachodzi stale, począwszy od temperatury nitowania około 800°C, przy której moduł sprężystości równy jest $E = 0$ aż do temperatury zwykłej, przy której $E = 2100000$ **). To też zjawisko zachodzące w nicie nie jest w dosłownym znaczeniu przekroczeniem granicy plastyczności.

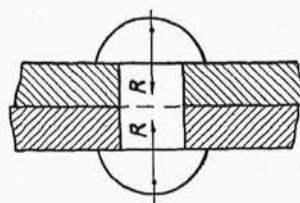
Zaznaczyć przy tem warto, iż rozciągnięcie nita spowodowane spadkiem temperatury od 800°C do temperatury pokojowej 20°C powoduje wyciągnięcie materiału szyjki nita około 10-krotnie większe

od wyciągnięcia odpowiadającego granicy plastyczności*).

W normalnym szwie nitowym, zwłaszcza jeżeli jednocześnie spełnia on zadanie środka uszczelniającego powierzchnie przylegające do siebie, nit nie pracuje na ścięcie, a jego rola ogranicza się do wywołania — w przyciskanych blachach — oporu tarcia przeciw wzajemnemu ich przesuwaniu się.

Wytrzymałość nita na ścinanie należy traktować jako wielkość zastępczą wzamian trudnej do uwzględnienia wartości oporu tarcia, zależnej od warunków wykonania nitowania.

Przyjmowanie takiej wielkości zastępczej jest możliwe jedynie w znormalizowanych szwach i byłoby nie do pomyślenia w szwie, w którym ustosunkowanie średnicy nita i podziałki do grubości łączonych blach nie byłoby ograniczone.



Rys. 1.

Łby nita (rys. 1) ściągają blachy kotłowe z siłą R , napewno mniejszą od siły odpowiadającej granicy plastyczności materiału szyjki nita w zwykłej temperaturze, powodując opór tarcia, sprzeciwiający się przesunięciu blach i zapewniając szczelność.

Należy jednak pamiętać, że i każda blacha na przyciskający ją łeb nita ciśnie siłami rozłożonymi na płaskiej powierzchni łba, dającymi wypadkową wartość R . Z taką samą siłą wypadkową cisną na siebie wzajemnie również blachy, warunkując potrzebne tarcie i szczelność.

***) Zgodnie z artykułem wspomnianym w poprzedniej cytacie, współczynnik rozszerzalności linowej $\alpha = \frac{\Delta l}{l}$ w zależności od temperatury t wyraża się następującym wzorem podanym przez autora $\alpha = \frac{0.00106 t + 1.15}{100000}$. Stosunek $\frac{\Delta l}{l}$ odpowiadający temperaturze $800 - 20 = 780^\circ \text{C}$ wynosi więc:

$\frac{\Delta l}{l} = \frac{0.00106 \times 800 + 1.15}{100000} \times 780 = \frac{15.6}{1000}$. Aby zaś szyjka nita w stanie zimnym osiągnęła granicę plastyczności $K_{pl} = 1800 \text{ kg/cm}^2$ należy ją wydłużyć zaledwie o $\frac{\Delta_1 l}{l} = \frac{K_{pl}}{E} = \frac{1800}{2100000} = \frac{0.86}{1000}$ tak że $\frac{\Delta l}{\Delta_1 l} = \frac{15.6}{0.86} \approx 18$.

*) Por. art. W. Rokittowskiego i Z. Klębowskiego „Nity narażone na rozciąganie w konstrukcjach kotłowych”. Techn. Ciepłota Nr. 11. z dn. 25 listopada 1932 r., str. 187.

**) Moduł sprężystości E stali kotłowej w zależności od temperatury t w stopniach C można określić w przybliżeniu zapomocą wzoru: $E = 2750 \sqrt{583000 - t^2}$ zaproponowanego przez autora w referacie wygłoszonym na VII Zjeździe Inż. Mech. Polskich w Warszawie w 1933 r. Wzór ten dla $t = 20^\circ \text{C}$ daje $E = 2100000$, a przy $t = 764^\circ \text{C}$ daje $E = 0$. Przegląd Techn. Nr. 4 z dn. 21 lutego 1934 r., str. 110.