

PRZEGLĄD TECHNICZNY

TYGODNIK POŚWIĘCONY SPRAWOM TECHNIKI I PRZEMYSŁU.

REDAKTOR Inżynier-technolog Czesław Mikulski.

TREŚĆ:

O pracach dr. inż. R. Modjeskiego i wielkich mostach amerykańskich, nap. prof. F. Kucharzewski.
Teoria kotłów parowozowych (dok.), nap. dr. A. Langrod.
Projekt polskich norm cementu portlandzkiego, nap. L. Karasiński.
Automatyzacja obróbki.
Ze Stowarzyszeń Technicznych.

SOMMAIRE:

Les travaux de dr. R. Modjeski et les grands ponts américains, par prof. F. Kucharzewski.
Théorie des chaudières de locomotives (suite et fin), par dr. A. Langrod.
Project des normes polonaises du ciment Portland, par prof. L. Karasiński.
La nécessité d'application des machines-outils automatiques.
Sociétés Techniques.

O pracach inżyniera R. Modjeskiego i wielkich mostach amerykańskich.

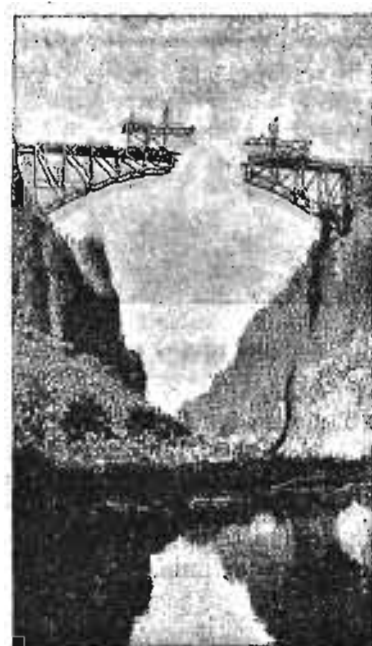
Podał prof. F. Kucharzewski.

Założony przed stu laty, dla popierania fizyki i jej zastosowań, Instytut Franklina w Filadelfji udziela nagrody i odznaczenia wybitnym technikom i wynalazcom. W pierwszym rzędzie tych odznaczeń stanęły ufundowane w r. 1914 medale Franklina, przyznawane odąd corocznie, w liczbie dwóch, w uznaniu prac, dokonanych nie tylko w Ameryce ale i w innych częściach świata, a mających poważny wpływ na rozwój fizyki i jej zastosowań. Wysokie znaczenie tych nagród uwidacznia lista laureatów, złożona z szeregu znakomitości naukowych i technicznych. W ciągu lat siedmiu 1915 — 1921 otrzymali medale Franklina, wraz z dyplomami członków honorowych Instytutu, uczeni fizycy: Kamerlingh Onnes — holender, Richards — amerykańkanin, Lorentz — holender, Mendenhall — amerykańkanin, Devar — Anglik, Arrhenius — szwed i Fabry — francuz; a jako technicy nagrodzeni zostali: Edison, John Carty — inżynier telefonów, Taylor — inżynier marynarki, Marconi, Squiers — inż. telegr. podmorskiego, Parsons — twórca turbiny parowej i Sprague — elektrotechnik. W roku ubiegłym otrzymali medale Franklina: fizyk angielski Józef Jan Thomson i inżynier amerykański dr. Ralf Modjeski. Ostatni laureat jest synem naszej słynnej artystki dramatycznej Heleny Modrzejewskiej, która przenosząc się do Ameryki, skróciła swe nazwisko na Modjeska, łatwiejsze do wymawiania dla yankesów. Skrócenie to zachował inż. Modjeski, przy swej naturalizacji w Stanach Zjednoczonych, ale pisząc po polsku, jak na przysłanej broszurze, podpisuje się pełnem nazwiskiem Modrzejewski.

Na uroczystych posiedzeniach Instytutu Franklina, przy wręczaniu medali, odczytywane są referaty o pracach laureatów. O Modjeskim zdawał sprawę w roku zeszłym inż. dr. Onward Bates z Chicago, zaznaczając, że skoro zadaniem Instytutu jest zachęcać i nagradzać pracowników, którzy przynieśli najwięcej pożytku dla ludzkości przez stosowanie nauk fizycznych, to dr. Ralf Modjeski zostaje odznaczony medalem Franklina, jako projektodawca i konstruktor mostów, mających epokowe znaczenie w dziejach sztuki inżynierskiej i świadczących o talencie, wiedzy i śmiałości swego twórcy.

Modjeski urodzony w Krakowie w 1861, tam chodził do szkół, a mając lat 15 przybył z matką do Ameryki, gdzie uzupełniał swe wykształcenie średnie. Następnie udał się do Paryża i w r. 1885 ukończył Szkołę Drog i Mostów. Wróciwszy do Ameryki, był przez lat siedem asystentem inż. Morisona, najprzód przy budowie

mostu kolejowego w Omaha, a następnie przy projektowaniu i budowie mostu na Mississippi pod miastem Memphis. W r. 1893 otworzył własne biuro techniczne w Chicago. Pierwszym mostem, jaki samodzielnie projektował i budował, był most na Mississippi w Rock Island (Illinois), dla dwóch torów kolejowych i drogi zwyczajnej. Nastąpiły potem projekty i budowy długiego szeregu mostów. O niektórych z nich przyjdzie mi mówić w dalszym ciągu, tu wspomnę tylko most łukowy na drodze żelaznej Ore-



Rys. 1. Budowa mostu łukowego na rzece Crooked.

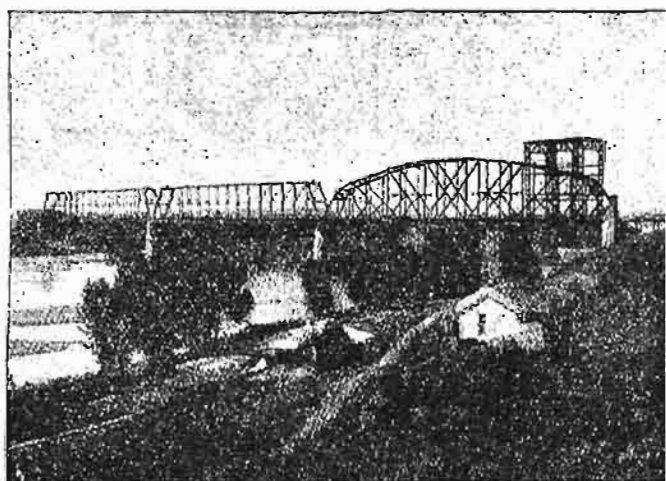
gon-Trunk, wzniesiony wysoko między skalistymi brzegami rzeki Crooked, o otworze 103 m. Na rys. 1 przedstawiona jest budowa tego mostu, dokonywana przy użyciu dwóch wind, przesuwanych po szynach. Obecnie buduje Modjeski wielki most na rzece Delaware w Filadelfji, o otworze przeszło półkilometrowym (533,40 m). Prace te wyrobiły mu wybitne stanowisko wśród inżynierów amerykańskich. Powoływano go do różnych komitetów projektowania i budowy, tak mostów, jak tuneli i dróg żelaznych. W r. 1911 otrzymał dyplom doktora inżynierji od uniwer-

sytetu stanu Illinois. W r. 1913 przedstawił Instytutowi Franklina rozprawę „O projektowaniu wielkich mostów ze szczególnym uwzględnieniem mostu pod Quebec“, przytaczaną z uznaniem przez inżynierów francuskich. Przed dwoma laty zamieścił w *Journal of the Franklin Institute* opis swego projektu mostu Filadelfijskiego; a na uroczystym posiedzeniu Instytutu, w r. ubiegłym, przy otrzymywaniu medalu, komunikował swe poglądy na rozwój budowy mostów w krótkiej rozprawie zatytułowanej „Mosty dawne i nowe“.

W Ameryce, przy projektowaniu większych mostów, stosowane są obecnie trzy typy przęseł, mianowicie: dźwigary kratowe przegibne, dźwigary wspornikowe (Cantilever) i mosty wiszące. Zestawia je Modjeski według wielkości otworów, dla jakich bywają projektowane, w sposób następujący:

Otwór mostu	Typ stosowany
do 228,60 m	Kratownica
od 198,12 m do 609,60 m	Wsporniki
od 457 m do 1219 m	Most wiszący

Łamane liczby metrów pochodzą tu z zamiany okrągłych liczb stóp angielskich, w jakich Modjeski podaje granice wielkości otworów. Mamy więc, dla otworów nieprzekraczających 750 czyli 228,60 m wskazane dźwigary kratowe przegibne, których ojczyzną jest Ameryka. Z pomiędzy różnych typów tych kratownic, najwięcej rozpowszechnione są obecnie: dźwigar Pratta ze słupami ściśkanymi a ukośnicami rozciągającymi i dźwigar Warrena z samymi ukośnicami. Budowano je dawniej z pasami równoległymi, później rozpowszechniły się pasy górne paraboliczne, tak że niektóre dawniejsze mosty z pasami rów-



Rys. 2. Przebudowa przęseł mostu na Missouri.

noległymi przerabiano na paraboliczne (rys. 2). Modjeski przerabiał w ten sposób w r. 1905 most na Missouri, pod miastem Bismarck, w stanie North Dakota, zbudowany w r. 1883. Na rys. 2 mamy rozpoczętą przeróbkę mostu: jedno przęsło jest już zastąpione parabolicznym, pod następnymi ustawiono rusztowania.



Rys. 3. Most Mac Kinley'a na Mississipi.

Modjeski projektował i budował ukończony w r. 1910 most Mac-Kinley'a na Mississipi, pod miastem St. Louis (rys. 3). Most ten, mający 766 m długości między wiaduktami dojazdowymi, składa się z ośmiu przęseł, z których trzy główne, w pośrodku rzeki, mają każde 125 m otworu

i utworzone są z dźwigarów kratowych, z pasem górnym parabolicznym i jazdą dolną; pozostałe przęsła mają jazdę górną i pasy równoległe, albo też pas dolny paraboliczny. Przez most przechodzą dwa tory kolei elektrycznej i dwie drogi wozowe, każda 4 m szerokości. Na lewo widać miasto St. Louis, a na prawo, w górze rzeki, w odległości około dwóch kilometrów stoi drugi podobny most dawniejszy, zwany Merchants Bridge.

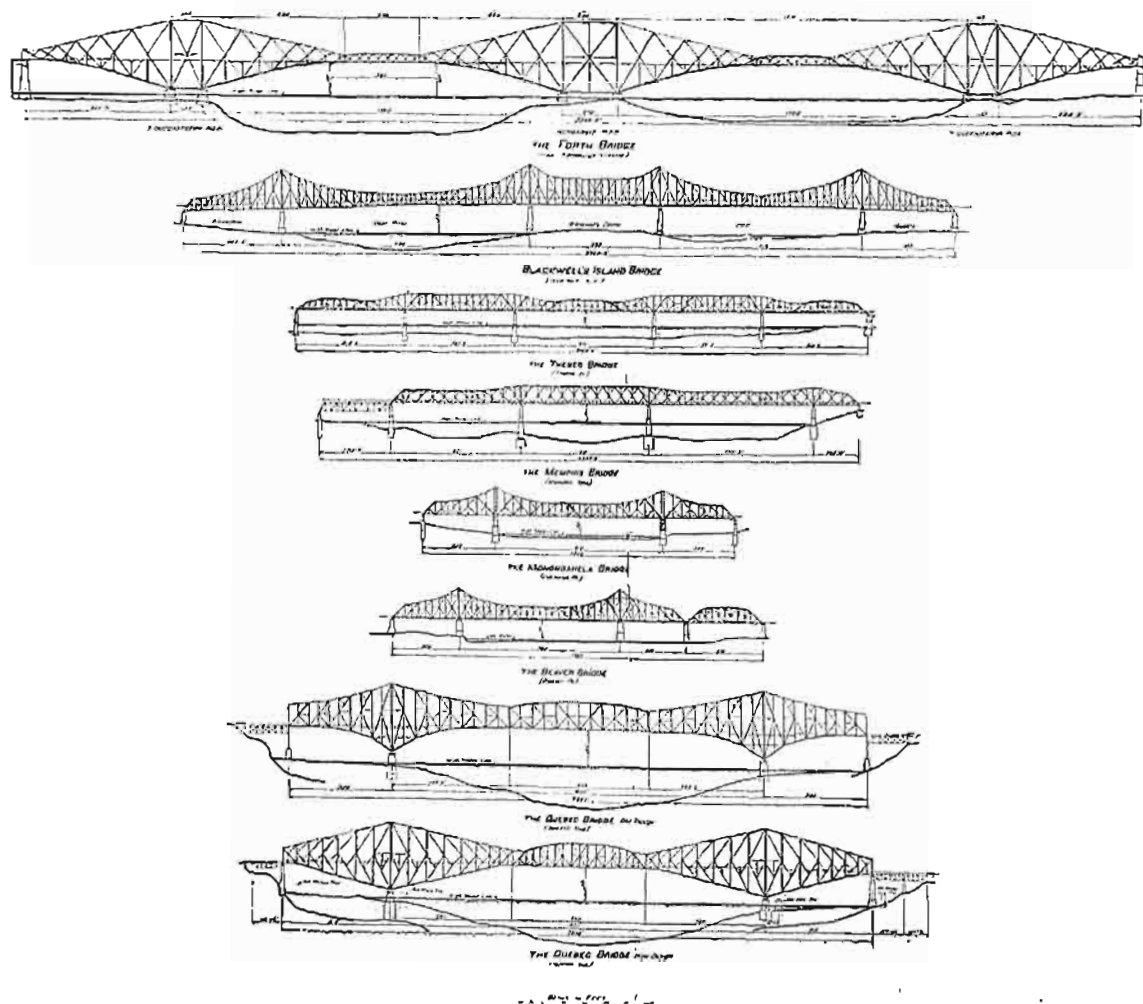
Dla otworów od 650 do 2000 stóp ang. czyli od 198 do 610 m stosują w Ameryce, jak zaznacza tablica, dźwigary wspornikowe. Angolicy nazywali je *Cantilever*, co po polsku znaczy *krokiecownica*. Pierwowzorem tego typu był ukończony w 1889 most na zatoce Forth pod Edynburgiem, o dwóch wielkich przęsłach, przeszło półkilometrowych. Znany dobrze jego wygląd przypomni nam szkic elewacji, podany u góry tablicy mostów wspornikowych amerykańskich (rys. 4), który dołączył Modjeski do rozprawy z r. 1913 o projektowaniu wielkich mostów. Uderzającą tu jest wysokość wsporników na filarach, wynosząca 103 m i grubość pasa dolnego wsporników, utworzonego z rur stalowych o podwójnych ścianach; średnica zewnętrzna tych rur mierzy przy filtrach 3,60 m. Na końcach wsporników, w pośrodku przęsła, zawieszona jest kratownica, 107 m długa. Dźwigary wspornikowe rozpowszechniły się szybko w Ameryce, dzięki temu głównie, że składanie ich na filarach skutecznianiem być mogło bez rusztowań. Wytworzono tam nowy typ tych dźwigarów, bez kratownicy zawieszonej w pośrodku przęsła, a przykładem tego typu jest drugi z rzędu na tablicy: most Blackwell's Island, o dwóch otworach 335 i 300 m i środkowym 190 m. Pod nim mamy most w Tebach, pierwszy projektowany i budowany samodzielnie przez Modjeskiego, o pięciu przęsłach: środkowym 205 m i czterech bocznych po 160 m. Dalej idzie, zbudowany dawniej przez inż. Morisona, most w Memphis, przy którego projektowaniu i budowie asystentem był Modjeski. Ale śmiałość inżynierów amerykańskich przekroczyła nawet wielkie otwory mostu na zatoce Forth. Most wspornikowy na rzece S-go Wawrzyńca, pod Quebec, zaprojektowany został o otworze 548,80 m czyli o 27,5 m większym niż otwory mostu na zatoce Forth. Most ten przedstawiony jest na tablicy przedostatni u spodu. Projektujący ten most inżynierowie uważali, że pierwowzór mostów wspornikowych, most na zatoce Forth, zbudowany był ze zbyt nadmiarem materiału i dążąc do lepszego wyzyskania wytrzymałości stali, narazili się na wypadek, który kosztował życie 74 pracowników. W sierpniu 1907 r., przy rozpoczęciu składania lewego wspornika, most się załamał, budowę przerwano, a wydelegowana przez rząd komisja inżynierska, której członkiem był Modjeski, orzekła, że powodem wypadku była niedostateczna wytrzymałość pasa dolnego przy filarze. Pas ten nie był, jak w moście Forth, rurowy, podwójny o średnicy zewnętrznej 3,60 m, lecz złożony był z blach stalowych i miał przekrój prostokątny 1,70 m na 1,50 m. Zgniecenie tego pasa spowodowało wypadek. Odrzucono więc zupełnie projekt pierwotny i przeprowadzono na tym samym miejscu budowę według nowego projektu, naszkicowanego u spodu. Otwór mostu pozostał ten sam, usztrój wsporników i kratownicy przyjęto nieco odmienny, szerokość mostu o 7 m większą, filary zbudowano nowe, przesuwając je o 20 m na lewo. Na rys. 4, dawne filary oznaczone są liniami kropkowanymi. Pas dolny tak samo złożony z blach stalowych mierzy w przekrojach 3 m x 2,20 m, a nie jak w pierwszym projekcie 1,70 m x 1,50 m. Mała podziałka rysunku słabo tylko uwydatnia to powiększenie grubości.

O załamaniu się mostu pod Quebec, podczas budowy, pisano w swoim czasie w czasopismach technicznych, podając szkic budowanej części wspornika, z windami sterującymi u góry, a służącymi do podnoszenia składanych części wspornika. Pas dolny, po lewej stronie filaru, zgnieciony był w miejscu, oznaczonym na rysunku literą Ag.

Wspornikowy system mostów przyszło Modjeskiemu jeszcze raz odtworzyć przy budowie drugiego mostu pod

miastem Memphis, nazwanego mostem Harahana, na cześć zmarłego przy początku budowy dyrektora Tow. dr. żel. Most ten, (rys. 6) ukończony w 1916 r., stanął tuż obok zbudowanego poprzednio przez Morisona, kiedy Modjeski był jego asystentem, i stanowi zupełną prawie kopję tamte-

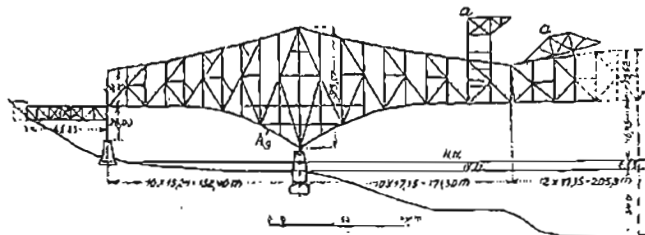
zbudowany w r. 1849, a dalej z r. 1885 most na Niagarze, poniżej wodospadu, o otworze ćwierćkilometrowym, z po-
kładem dwupiętrowym, drogą zwyczajną u spodu a torem kolejowym u góry, podtrzymywany przez drugą parę lin, widoczną na rysunku. Belki podłużne tego dwupiętrowego



Rys. 4. Mosty wspornikowe.

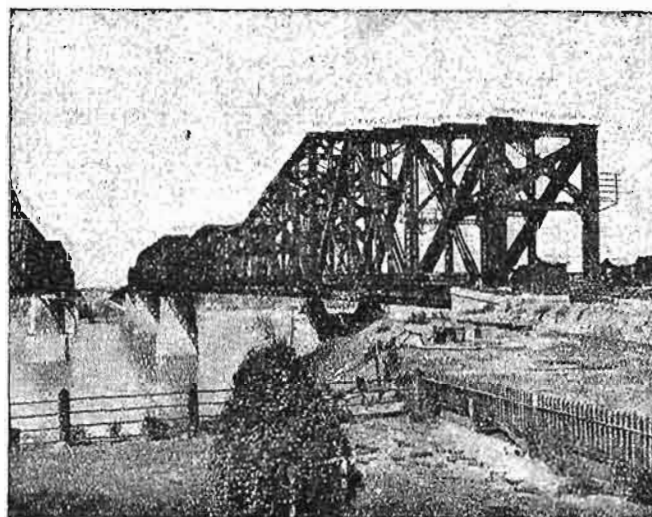
go mostu, który widać obok na lewo. Przez każdy z tych mostów przechodzą dwa tory kolejowe i dwie drogi wozowe po 4 m szerokości. Między wiaduktami dojazdowymi każdy most ma pięć otworów 56, 240, 189, 184 i 106 metrów. W środku drugiego przęsła o otworze 240 m uwidoczni się kratownica z parabolicznym pasem górnym, 124 m długa, między wspornikami, wysuniętymi poza filary, każdy na 58 m.

mostu mają do 7 m wysokości. Rysunek uwidoczni także wieżary ukośne, dochodzące od wież do ćwierci długości.



Rys. 5. Most pod Quebec na rzece Św. Wawrzynca (zalanany).

Według zestawienia Modjeskiego, dla otworów od 1500 do 4000 st. ang., czyli 457 do 1219 m projektowane bywają w Ameryce mosty wiszące. Dawne dzieje tych mostów streszcza tablica (Rys. 7) wyjęta z dzieła prof. Croisette-Denoyers, zaczynając od pierwszego większego mostu wiszącego, o 177 m otworu, zbudowanego przez Telforda nad cieśniną Menay w r. 1820. Między późniejszymi, mamy tu most łańcuchowy Budapeszteński o otworze 203 m,

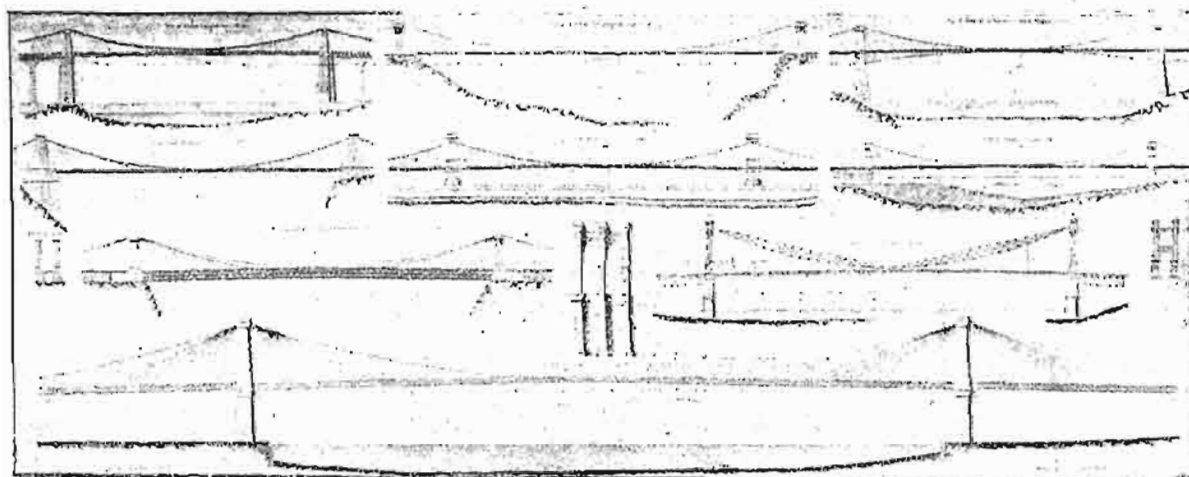


Rys. 6. Most wspornikowy Harahan pod Memphis.

mostu. Przedstawiona z boku elewacja filara ukazuje tor kolejowy między wieżami i drogę zwyczajną pod arkadą. Obok przedstawiony jest, również amerykański Point

Bridge w Pittsburgu, o otworze 244 m, zbudowany w 1887 r., oryginalnie usztywniony w ten sposób, że po zwykłym zawieszeniu mostu na linach i uregulowaniu wygięcia lin, dodano nad nimi drugie liny, wiążące w linach prostych środek mostu z wierzchołkami wież oraz kratowanie między linami głównymi a dodanymi, zapewniając niezmienną wygięcia lin głównych.

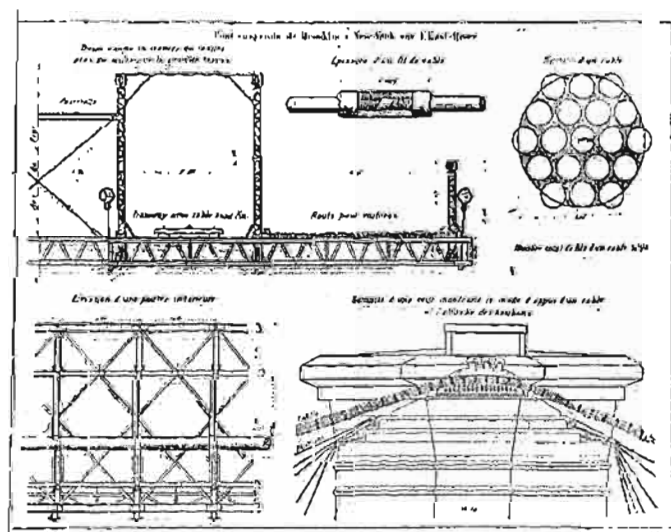
Szczegóły tego pierwowzoru dzisiejszych wielkich mostów wiszących amerykańskich, przedstawione są na następnym rysunku 8. Mamy więc najprzód połowę przekroju poprzecznego. Całkowita szerokość pokładu wynosi 26 m. Most zawieszony jest na czterech linach, których dwie widzimy na połowie przekroju poprzecznego. Z czterech wielkich belek podłużnych mamy tu dwie na rysunku, tworzące



Rys. 7. Mosty wiszące.

Tę historię dawniejszych mostów wiszących zamyka rysunek zbudowanego w 1883 r. słynnego mostu Roeblinga, między Nowym-Jorkiem a Brooklynem. Nad elewacją mostu, zajmującą cały spód tablicy, umieszczona jest elewacja boczna jednej z wież. Most ten zasługuje na uwagę, nie tylko dla wielkości otworu środkowego przęsła, wynoszącej 486,50 m (t. j. o 11 m więcej niż długość całego mostu Kierbedzia), lecz także dla wysokości wieży $84\frac{1}{2}$ m nad poziomem wysokich wód, oraz trudności, jakie wypadło pokonywać przy budowie, prowadzonej podczas ożywionego ruchu, tak statków na East River, jak i ruchu ulicznego na wybrzeżu i sąsiednich ulicach. Budowę rozpoczęto w 1870 i w ciągu lat sześciu wzniesione zostały mury filarów i przyczółków. Liny mostu wiszącego, w liczbie czte-

z wiązaniem górnym i belkami poprzecznymi jakby most tubularny, mieszczący w sobie jeden z dwóch torów kolejowych. Wnętrze każdego z tych dwóch kolejowych przejazdów ma 4,78 m wysokości a 3,86 m szerokości. Chodnik dla pieszych, 4,78 m szerokości, umieszczony jest wysoko w środku mostu, tak, że przechodzący mają otwarty widok na obie strony, bo górne części belek podłużnych, stanowiące poręcze, wznoszą się tylko na 1,20 m nad chodnikiem. Po bokach umieszczone są jeszcze dwie belki podłużne niższe, stanowiące barjery dla dróg zwyczajnych, 5,71 m szerokości. Belki te wznoszą się na 2,23 m nad pomostem drewnianym każdej drogi. Dalej przedstawione jest spojenie jednego druta liny, przekrój liny 0,40 m grubej, złożonej z 5296 drutów, tworzących 19 pęków, — elewacja boczna jednej z czterech wielkich belek kratowych podłużnych, wreszcie przewinięcie liny na siodełku u szczytu wieży, umieszczonem na rolkach, tak aby lina wraz z siodełkiem mogła się przy rozszerzaniu lub kurczeniu, w skutku zmian obciążenia lub temperatury, przesuwować swobodnie, nie naruszając równowagi wieży. Pod liną widzimy z każdej strony wieży umocowania wieszaków ukośnych.



Rys. 8. Szczegóły mostu Brooklyńskiego.

rech, przechodzą przez szczyty wież i, wypuszczone w mury przyczółków, sięgają końcami do spodu tych murów. Na końcach lin umocowane są ciężkie płyty żelazne, utkwione jak kotwice wewnątrz murów. Most usztywniony jest wieszakami ukośnymi, umocowanymi na szczytach wież, a dochodzącymi z każdej strony do ćwierci otworu mostu.

Most Brooklyński kosztował 15 milionów dolarów; projektodawcą i kierownikiem budowy był znakomity inżynier John A. Roebling; zmarł on wskutek wypadku, gdy kończono zakładanie fundamentów pod jedną z dwóch wielkich wież. Zastępujący go następnie w kierownictwie budowy syn, Washington A. Roebling, stracił zdrowie zbyt długo przebywając w kesonach w sprężonym powietrzu. Ojciec i syn drogo przypłacili powodzenie, zapisując swe nazwiska w rzędzie najznakomitszych inżynierów ubiegłego stulecia. Owoc ich pracy, most na East River, między Nowym-Yorkiem a Brooklynem, uważany jest dotąd za arcydzieło sztuki inżynierskiej. Na jego wzór stanęły obok, powyżej na East River dwa inne mosty między Nowym Yorkiem a przedmieściami Brooklynu: w r. 1903 Williamburg Bridge, a w r. 1909 Manhattan Bridge.

Wracając do rysunku, uwidoczniającego przewinięcie lin przez wieże mostu Brooklyńskiego (rys. 8), zaznaczyć trzeba, że tak tych potężnych wież murowanych, jak i sposobu zawieszenia lin, nie naśladowano już przy projektowaniu późniejszych mostów. Zauważono bowiem w r. 1907 przerywane a raptowne ruchy siodełek, zagrażające całości lin; ruchy te były skutkiem zwiększającego się nieregular-

nie w pewnych chwilach ruchu pociągów, które zbyt szybko wchodziły na most, jedno po drugim. Wprowadzono więc surową reglamentację przepuszczania pociągów; niepokojące ruchy siodełek przestały się powtarzać, zauważono wszakże, że odkąd siodełka się nie ruszają, to same

wieże podlegają lekkim wahaniom. Wahania te są wprawdzie bardzo małe, ale w każdym razie wysoce niepożądane, gdyż wprowadzają w grę nieokreślony czynnik, mianowicie sprężystość i wytrzymałość muru na zgięcie.

(d. n.)

TEORIA KOTŁÓW PAROWOZOWYCH.

Podał Dr. A. Langrod,

(Dokończenie do str. 471 w № 46 r. b.)

Do zbadania wpływu poszczególnych wymiarów powierzchni ogrzewalnej płomieniówkowej na przenoszenie ciepła przez tę powierzchnię, nadają się najlepiej wyniki doświadczeń Henry'ego. Jak już wspomniałem, kocioł użyty do doświadczeń był tak zbudowany, że długość jego płomieniówek dawała się stopniowo zmniejszać bez zmiany paleniska i dymnicy. Powierzchnia pochyłego rusztu wynosiła $2,34 m^2$ a w rzucie poziomym $2,24 m^2$. Doświadczenia wykonano przy nadprężności pary 10 at, z mosiężnymi płomieniówkami gładkimi i z płomieniówkami systemu Serve'a o następujących wymiarach:

	Płomieniówki		
	gładkie	systemu Serve'a	
Średnica zewnętrzna= d , mm	50	50	65
„ wewnętrzna, mm	46	—	—
Stosunek obwodu do przekroju w świetle $\frac{\pi}{f} \frac{1}{m}$	87	184	144
Liczba płomieniówek . . .	185	185	113
Powierzchnia ogrzewalna od strony gazów spalinyowych na 1 m długości= $\frac{Hr}{l}$, m	26,73	47,00	40,80
Długość płomieniówek= l , m	3	2	2,5
	3,5	2,5	3
	4	2	3,5
	4,5	3,5	—
	5	—	—
	6	—	—
	7	—	—

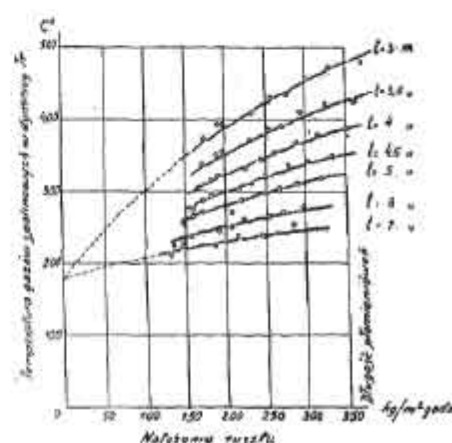
W doświadczeniach tych badano również wpływ, jaki na pracę kotła wywiera sklepienie paleniskowe różnej długości i ogrzewalnik Tenbrinka w palenisku w formie sklepienia. Znaczny wpływ sklepienia paleniskowego na temperaturę gazów wylotowych w dymnicy—o którą nam tu przede wszystkim idzie—nie przejawia się w wynikach tych doświadczeń, natomiast ogrzewalnik Tenbrinka obniża tę temperaturę widocznie.

Z wyników powyższych doświadczeń Henry'ego oraz doświadczeń na stanowisku dynamometrycznym w St. Louis i Altoona, doświadczeń prof. Gossa na stanowisku dynamometrycznym uniwersytetu Pardue w Lafayette i doświadczeń na stanowisku dynamometrycznym uniwersytetu Illinois w Urbana, otrzymuje się następujący związek między temperaturą gazów spalinyowych po opuszczeniu płomieniówek T_r , temperaturą wody w kotle T_w i natężeniem rusztu b

$$T_r - T_w = \frac{Mb}{500 + b},$$

przyczem T_r i T_w są mierzone w stopniach C, b w kg/m^2 -godz., a M jest dla danego parowozu i paliwa ilością stałą.

Dla przykładu, na rys. 5 przedstawione są wyniki doświadczeń Henry'ego z płomieniówkami gładkimi i sklepieniem paleniskowym różnej długości i bez sklepienia.



Wyniki doświadczeń Henry'ego z płomieniówkami gładkimi

Rys. 5.

Wyrysowane na tym rysunku linje, przedstawiające związek między temperaturą T_r i natężeniem rusztu b , odpowiadają powyższemu wzorowi, co dowodzi zgodności tego wzoru z wynikami doświadczeń.

Podług wyników doświadczeń na stanowiskach dynamometrycznych, dokonanych z 11 różnymi parowozami, współczynnik M waha się między 245 i 435.

Doświadczenia Henry'ego pozwalają określić wpływ długości płomieniówek na temperaturę T_r , mianowicie ze stosunkowo znaczną dokładnością, jak to uwidocznia rys. 5,

$$T_r - T_w = \frac{Ab}{500 + b} e^{-al} \quad \dots \quad 7)$$

przyczem e jest podstawą logarytmów naturalnych, l oznacza długość płomieniówek w metrach zaś A i a są liczbami stałymi.

Aby porównać równanie powyższe z równaniem otrzymanem dla różnicy temperatur $(T_r - T_w)$ drogą teoretyczną, należy uwzględnić, że podczas doświadczeń mierzono temperaturę gazów wylotowych w dymnicy, jakkolwiek blisko, to jednak w różnej odległości od ściany sitowej i że temperatura ta jest nieco niższa od temperatury u wylotu płomieniówek. Jeżeli oznaczmy teraz tę ostatnią temperaturę przez T_r^1 , to według ustępu poprzedniego

$$(T_r^1 - T_w) = (T_r - T_w) e^{-al},$$

gdzie T_r oznacza temperaturę gazów spalinyowych przy ich wlocie z paleniska do płomieniówek.