



**Politechnika Warszawska**

Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

**INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ**

im. Bohdana Stefanowskiego

# **Wybrane aspekty modernizacji skraplacza energetycznego**

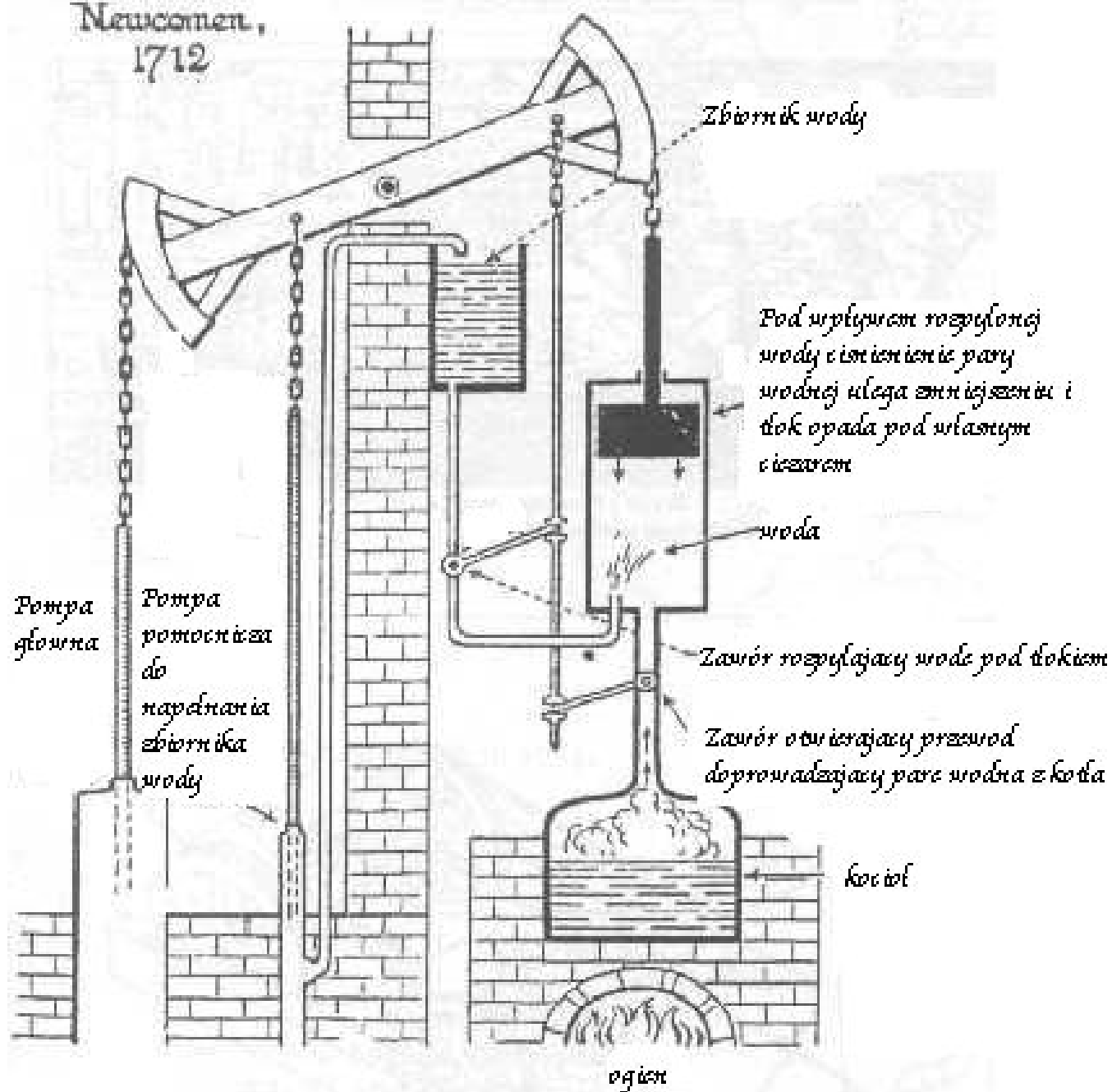
**Artur Rusowicz**

**Andrzej Grzebielec**

# WPROWADZENIE

- W chwili pojawienia się pierwszych maszyn parowych znalazło zapotrzebowanie zjawiska skraplania par. Pierwsze maszyny parowe T. Savery'ego z 1698 roku wykorzystywały skraplacze w formie zbiorników na parę wodną, których płaszc polewany był zimną wodą.
- Następnie maszyny parowe tłokowe T.Newcomena z roku 1705 wykorzystywały zjawisko skraplania wewnątrz cylindra maszyny parowej. Następował wtrysk strumienia zimnej wody do przestrzeni cylindra wypełnionego parą wodną pochodzącą z kotła. Skroplenie pary wodnej obniżało ciśnienie w cylindrze pod tłokiem i opuszczało tłoka do dołu, przy jednoczesnym podnoszeniu ramienia dźwigni. Następnie dopuszczano z kotła pewną ilość pary, która unosiła tłok do góry. Urządzenie Newcomena pracowało dosyć powolnie, wykonując dwanaście do piętnastu cykli na minutę. Górną część cylindra polewano wodą, w celu uszczelnienia układu cylindra z tłokiem, a woda dostająca się pod tłok wspomagała dodatkowo proces skraplania pary w cylindrze.
-

Newcomen,  
1712



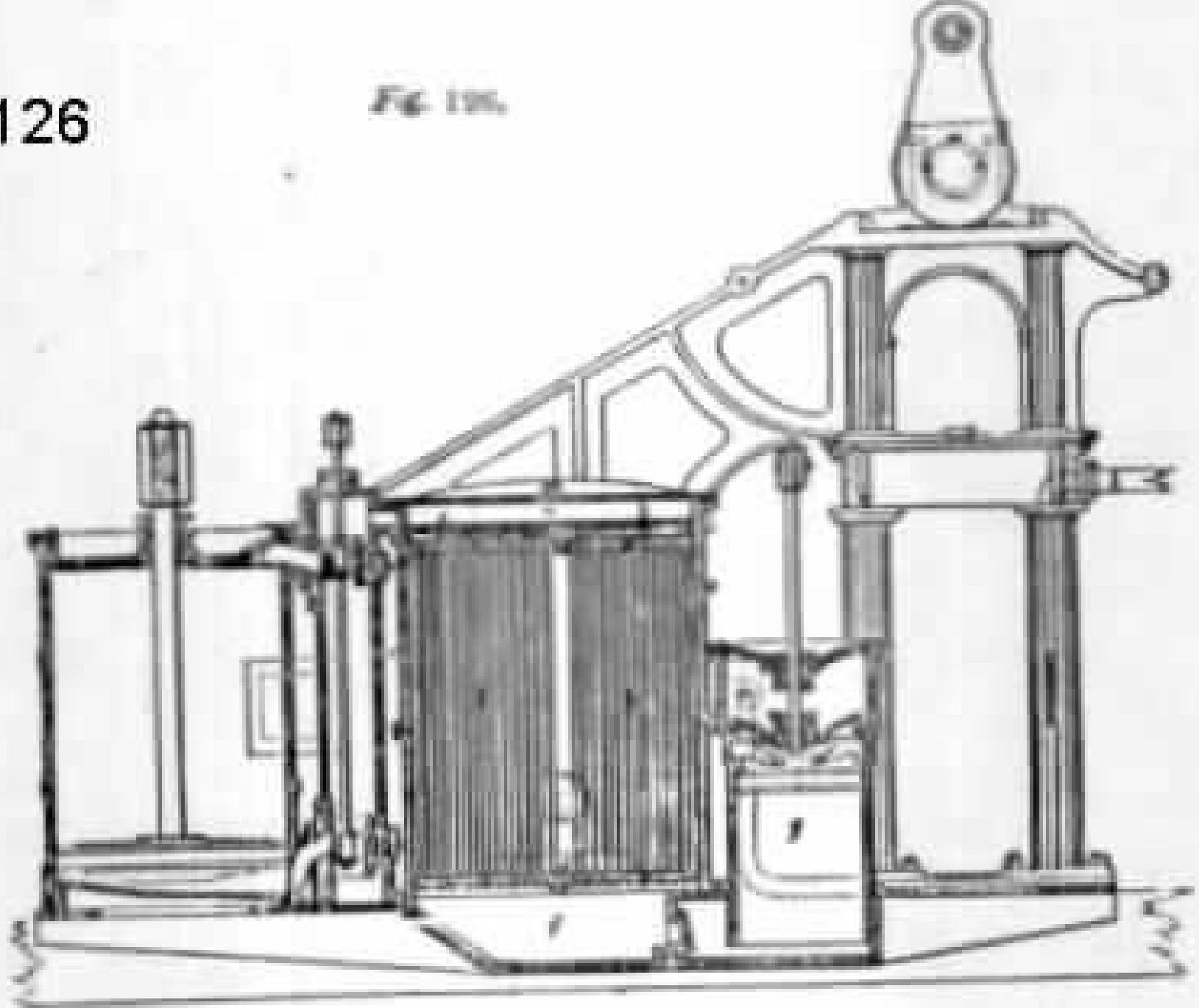
DIAGRAMMATIC VIEW OF NEWCOMEN'S ATMOSPHERIC OR  
FIRE ENGINE (1712)

# James Watt

Następnie na bazie modelu maszyny T.Newcomena, znajdującej się na wydziale fizyki na Uniwersytecie w Glasgow James Watt zaproponował nowe rozwiązanie techniczne nazwane maszyną parową Watta z 1763 roku. Pierwszy model maszyny parowej Watta zbudowany był z mosiężnego cylindra do którego podawana jest para rurami na przemian z jednej i drugiej strony tłoka. cylinder połączony był rurą ze skraplaczem. Skraplacz składał się z dwóch pionowych rur mosiężnych przylutowanych do poziomego kolektora i układu pompki ręcznej, usuwającej powietrze ze skraplacza. Zarówno skraplacz, jak i pompka zanurzone były w wodzie. Następnie sam J.Watt udoskonalił znacznie swoją maszynę parową, **a w stosunku do skraplaczy udoskonalił konstrukcję. Pojawiły się typowe skraplacze z rurami usytuowanymi pionowo, zanurzone w wodzie.**

fig126

Fig 126.



# Charles Parsons

Następnym ważnym elementem w historii maszyn parowych, jak również skraplaczy energetycznych było pojawienie się turbiny parowej i skraplacza Ch. Parsonsa. W roku 1884 inżynier Charles Parsons zrewolucjonizował wytwarzanie energii elektrycznej przez wynalezienie turbiny parowej. W 1892 roku Ch. Parsons zbudował pierwszą turbinę ze skraplaczem. **Konstrukcja skraplacza oparta była na typowym obecnie wymienniku płaszczowo rurowym z pionowym usytuowaniem rur w płaszczu.** Jednak dopiero w 1897 roku wyniki prac zostały szerzej zauważone. Niewielki parowiec „Turbinia” (wyporność 44,5 tony) wyposażony w turbinę parową, napędzany trzema śrubami, osiągnął na ówczesne czasy niezwykle wysoką prędkość 32,7 węzłów

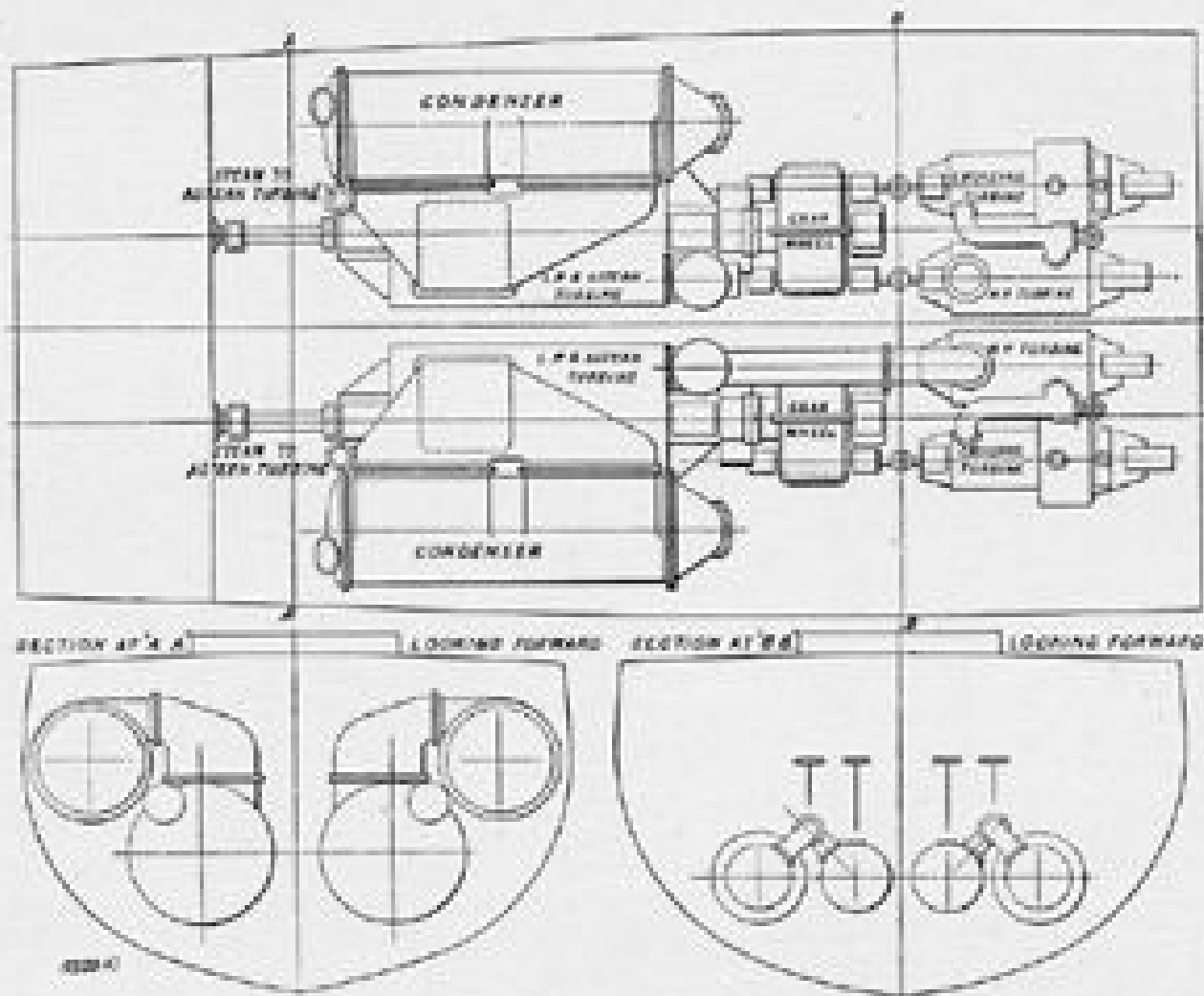


Fig. 50. Geared Turbines in Twin Screw Torpedo Boat Destroyer.

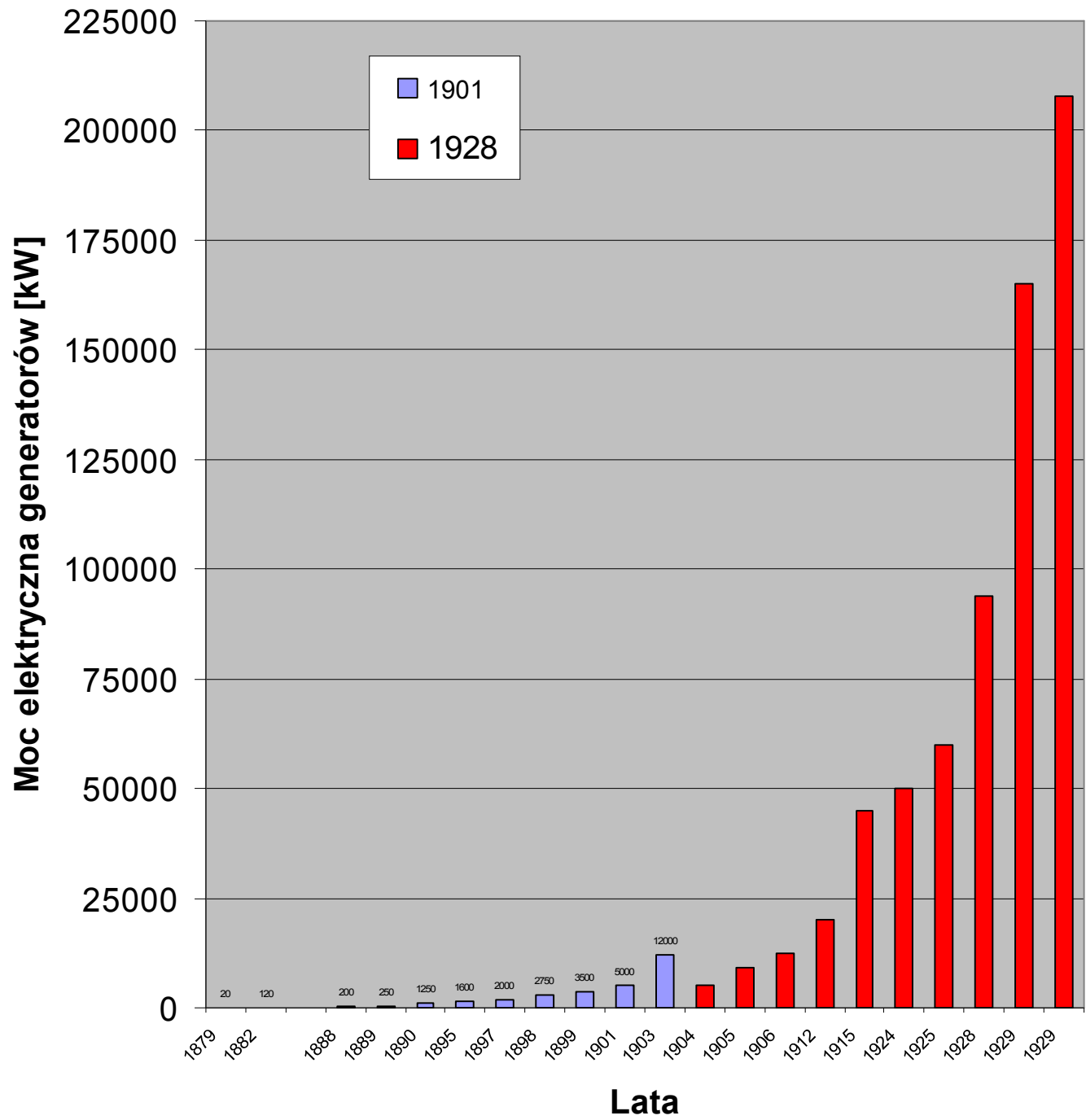
# Elektrownie

Chociaż prąd elektryczny pod koniec XIX wieku był już dość szeroko wykorzystywany, to nie myślano jeszcze o upowszechnieniu energii elektrycznej na skalę masową. Potrzebę dostarczania prądu elektrycznego większej liczbie odbiorców stworzył wynalazek praktycznej żarówki elektrycznej. Jej wynalazca Th.A.Edison był zarazem założycielem pierwszej publicznej elektrowni zbudowanej w Nowym Jorku. Uruchomiona w 1882 roku miała 6 prądnic prądu stałego, z których każda poruszana była silnikiem parowym o mocy 125 KM. Ta pierwsza elektrownia miejska zasilala prądem o napięciu 110 V sieć elektryczną, do której włączono 7200 żarówek.

Pierwsza duża elektrownia prądu zmiennego powstała w 1885 roku w Deptford pod Londynem.

Jedna z największych elektrowni w latach 20-tych XX wieku mieściła się w Chicago o mocy 50 MWe. Do skraplaczy o pionowym usytuowaniu rur dopływała para o ciśnieniu ok. 0,14 kg/cm<sup>2</sup>. Każdy ze skraplaczy składał się z 5940 rur o długości 5,5 metra i średnicy wewnętrznej 2,5 cm. Przepływ wody chłodzącej pochodzącej z jeziora Michigan to 158 t/min. Otrzymywane ciśnienie w skraplaczu 74 cm H<sub>2</sub>O

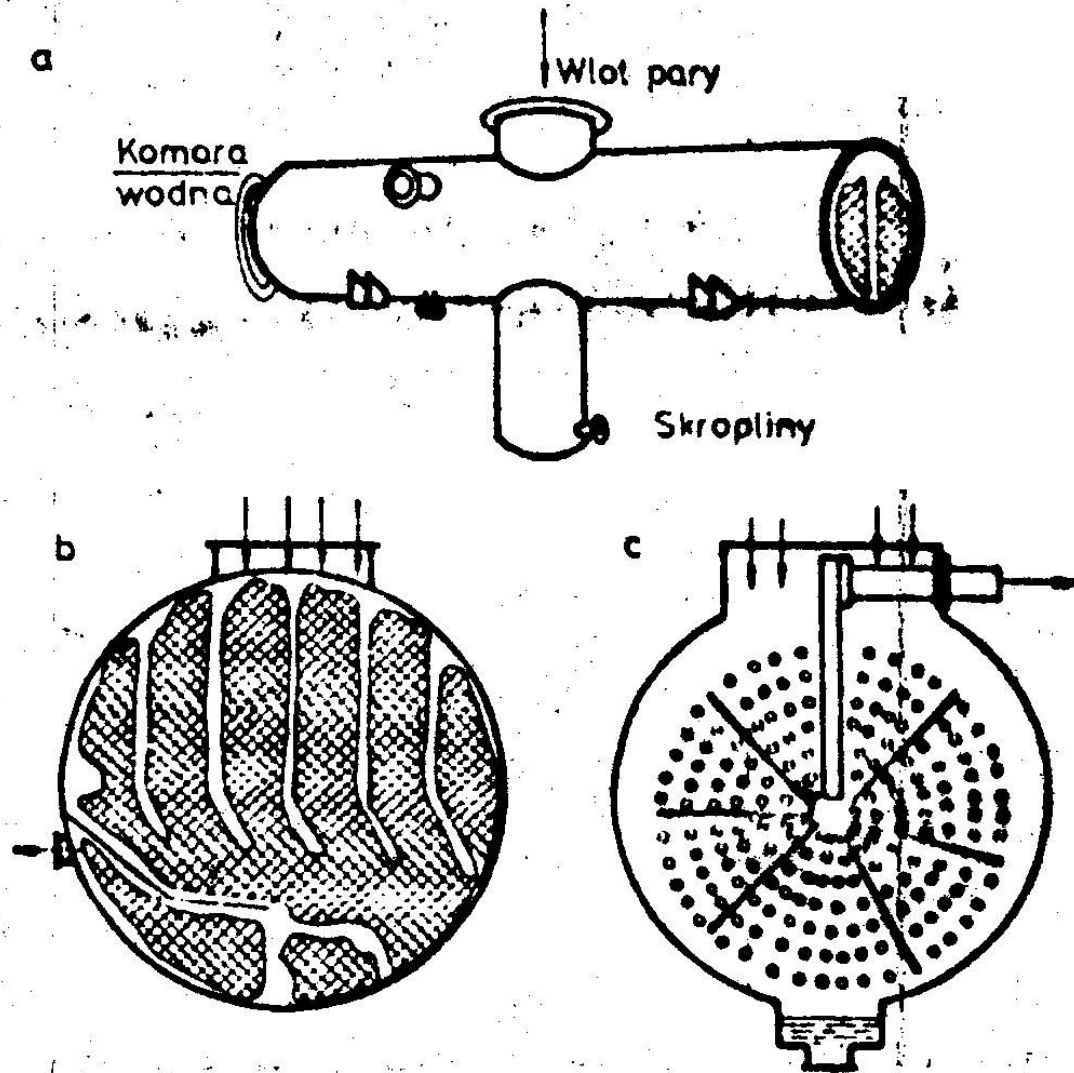




Lata

# Generacje skraplaczy

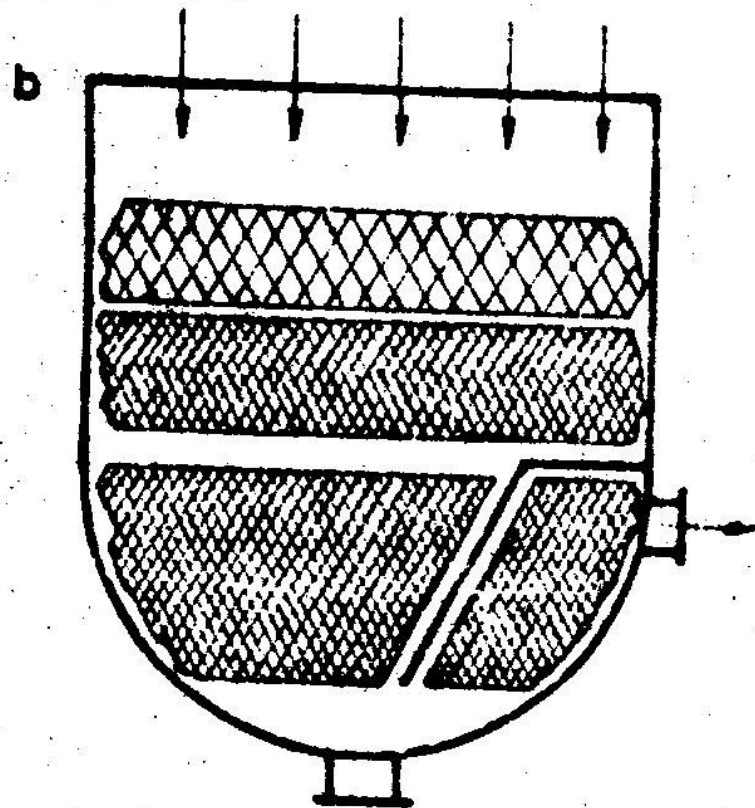
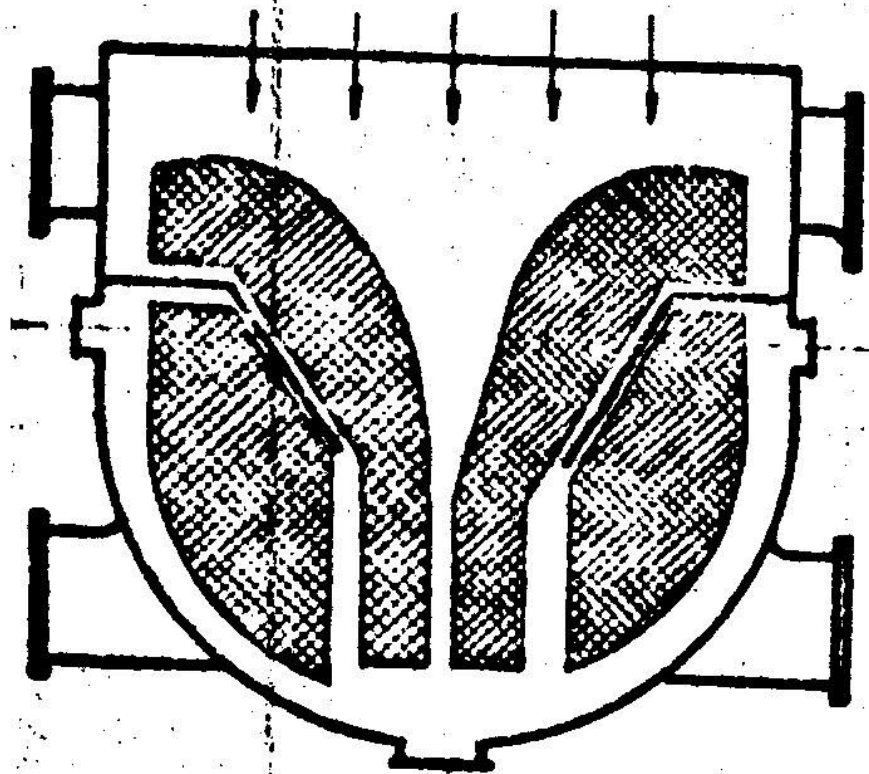
W skraplaczach pierwszej generacji konstrukcja nie różniła się od typowych wymienników ciepła płaszczowo-rurowych. Wlot pary był stosunkowo mały, więc w celu ułatwienia rozprywu pary wzdłuż skraplacza w pęku rur wycinano kanały. Bardzo często w tych, skraplaczach nie było wydzielonej części pęku rur do dochłodzenia powietrza, a funkcję tę spełniał dodatkowy wymiennik ciepła umieszczony na zewnątrz. Niekiedy też pęk rur sytuowano niecentrycznie względem płaszcza, w celu ułatwienia dopływu pary.



Skraplacze pierwszej generacji: a) widok ogólny; b) Worthington z 1906 r.; c) Westinghaus z 1919 r.

## II Generacja

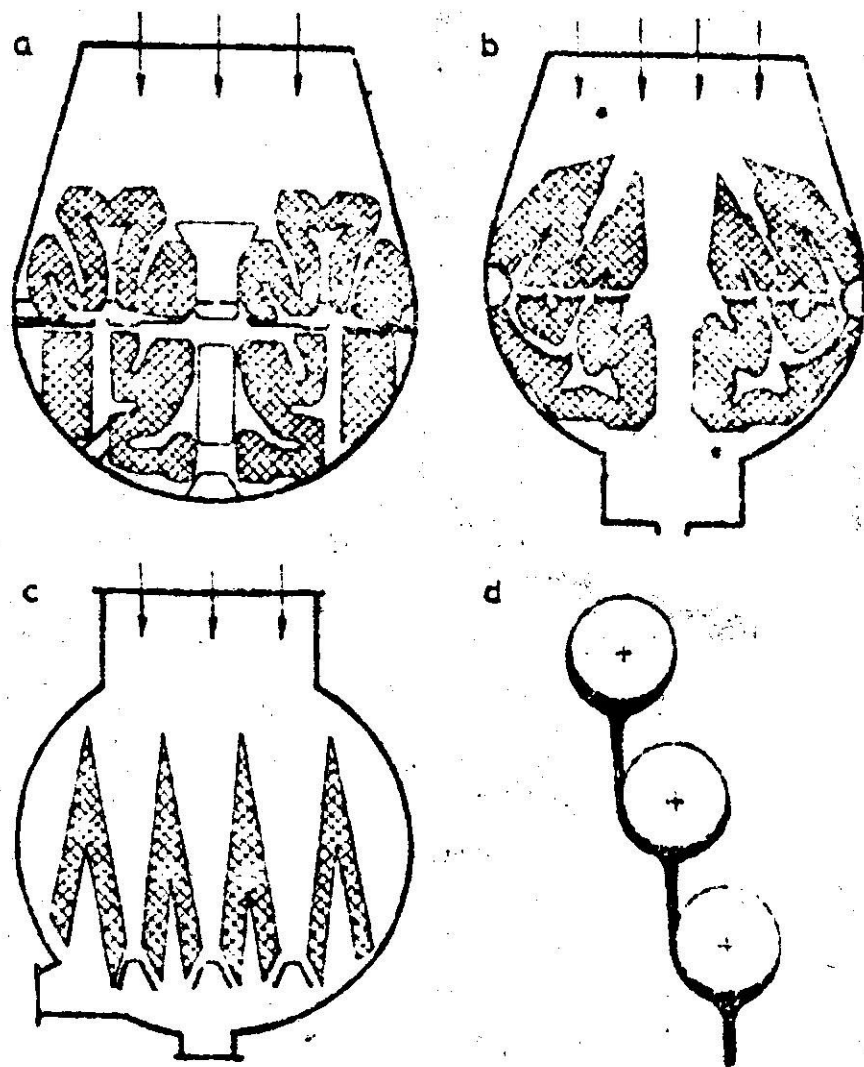
W skraplaczach drugiej generacji szczególną uwagę zwrócono na minimalizowanie oporów cieplnych warstwy skroplin przez zapewnienie dużej prędkości przepływu pary względem rur. Uważano, że przepływ pary w skraplaczu powinien być jednowymiarowy, a prędkość jego stała w kolejnych rzędach rur. Uzyskiwano to albo dzięki odpowiedniemu doborowi kształtu pęku rur, albo przez zmianę podziałki rozmieszczenia rur. Jednocześnie w celu zminimalizowania oporów przepływu pary jej wlot znacznie zwiększono, tak aby para dopływała równomiernie na całej długości rur. Obserwowano duże spadki ciśnienia pary.



**Skraplacze drugiej generacji: a) Weir z 1925 r.; b) Sim z 1925 r.**

# III Generacja

W skraplaczach trzeciej generacji za główny cel stawiano minimalizowanie oporów hydraulicznych przepływu pary przez pęk rur oraz oporów cieplnych skroplin spływających z wyżej położonych rur. Pęk rur kształtowano w postaci różnie ułożonej wstęgi, tak że para płynąc napotykała najwyżej 10-15 rzędów rur. Jednocześnie przypisywano bardzo ważną rolę spływowi skroplin z rury na rurę. Pogląd ten wynikał z błędnych ocen powstającej struktury spływu skroplin między rurami, co było przyczyną zawyżania wartości oporu cieplnego skroplin w kolejnych rzędach. Uważano, że wzrasta on bardzo szybko dla kolejnego (z punktu widzenia spływu skroplin) rzędu ( $n$ ) rur. Określano to w zależności od  $n$  do potęgi 0,25. Dziś wiadomo, że wykładnik potęgi jest równy zaledwie 0,07. Spływ skroplin kształtowano przez odpowiednie usytuowanie rur oraz umieszczanie tac do ich odprowadzenia.

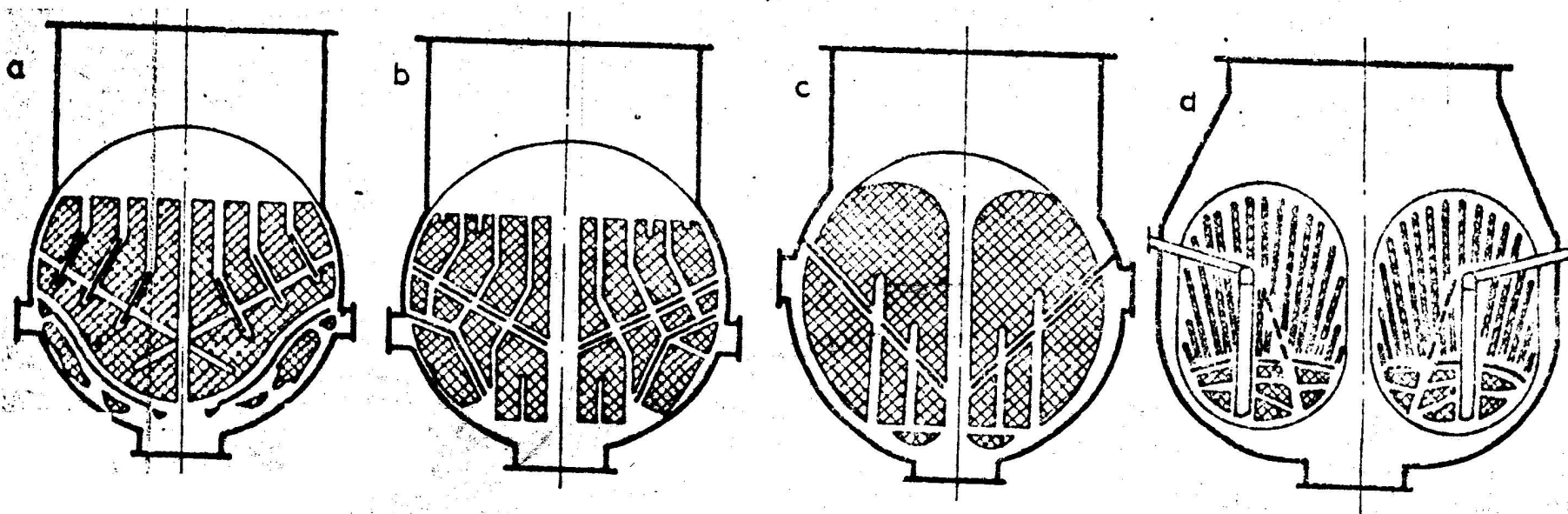


Skraplacze trzeciej generacji: a) Westinghaus z 1930 r.; b) konstrukcja radziecka (Kafuga) z ok. 1945 r.; c) konstrukcja francuska z 1930 r.; d) usytuowanie rur (typu Ginabat)

# IV Generacja

W skraplaczach czwartej generacji dążono do wzrostu intensywności wymiany ciepła na rurach przez zapewnienie dobrego dopływu pary do każdej rury w pęku, tak aby nie następowało zbieranie się gazu obojętnego. W tym celu w *obrębie zwartych* pęków rur tworzone kanały dopływowe, lub odpływowe, jednocześnie umieszczając przegrody odprowadzające skropliny i kształtujące przepływ pary. Sposób rozwiązywania tych zagadnień można prześledzić na przykładzie skraplaczy firmy MAN. Powszechnie przestrzegano zasady doprowadzania świeżej pary bezpośrednio z wlotu do dolnych rejonów skraplacza w celu podgrzania skroplin spływających z dolnych rur.

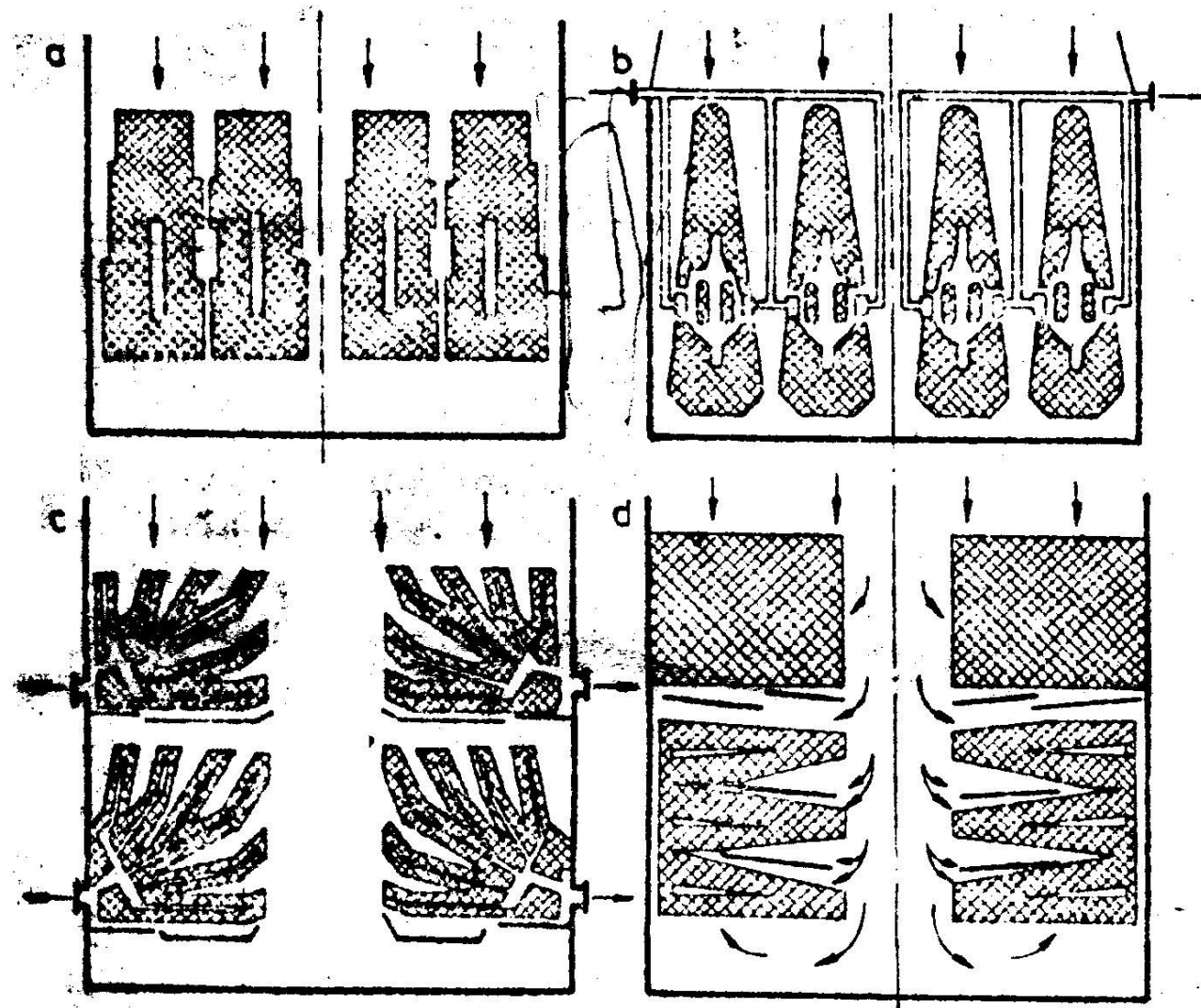




Skraplacze czwartej generacji firmy MAN: a) z 1930 r.; b) z 1940 r.; c) z 1950 r.; d) z 1960 r.

# V Generacja

W skraplaczach piątej generacji również dążono do uzyskania możliwie najwyższego i równomiernego obciążenia cieplnego poszczególnych rur w pęku. Zmieniono jednak znacznie zasady kształtowania pęku rur. Zwracano uwagę na dopływ pary do całego pęku ze wszystkich stron i przepływ pary przez pęk rur. W tym celu podzielono go na moduły i wprowadzono szerokie kanały między nimi, ułatwiające dopływ pary również od dołu. Powszechnie zaczęto stosować odsysanie powietrza ze środka modułu, co zapobiegało zbieraniu się gazu obojętnego (powietrza) w niektórych obszarach skraplacza. W najnowszych rozwiązaniach w celu zminimalizowania oporów przepływu dodatkowo zastosowano niejednorodną podziałkę rur w pęku; w części zewnętrznej są one rzadsze niż w wewnętrznej.



Skraplacze piątej generacji: a) firmy BBC (200 MW) z 1970 r.; b) firmy BBC (270 MW) z 1974 r.; c) firmy CEGB z 1975 r.; d) firmy CEGB (500 MW) z 1976 r.

# Skraplacze energetyczne

- Analiza pracy istniejących skraplaczy energetycznych
- Symulacje numeryczne pracy skraplaczy
- Projekty skraplaczy energetycznych

# Model matematyczny

Równanie ciągłości dla mieszaniny parowo-powietrznej:

$$\frac{\partial(\beta\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta\rho v)}{\partial y} = -\beta\dot{m}$$

Równania pędu dla mieszaniny:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\beta\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta\rho vu) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\beta\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\beta\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y}\right) - \beta \frac{\partial p}{\partial x} - \beta\dot{m}u - \beta F_u$$

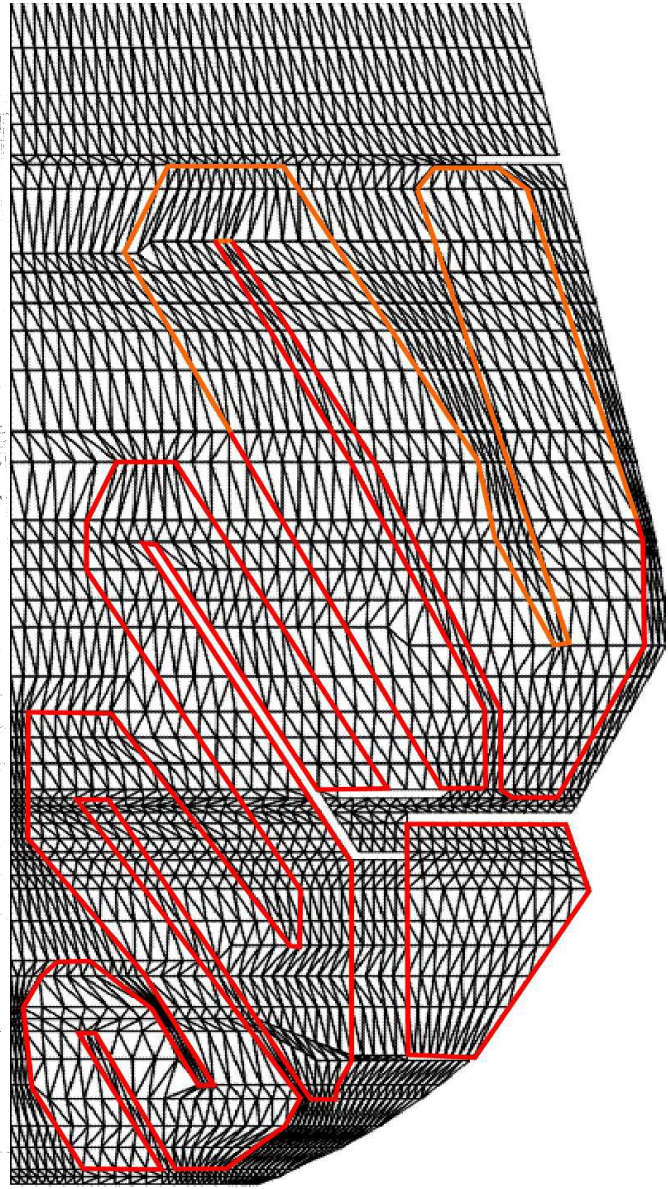
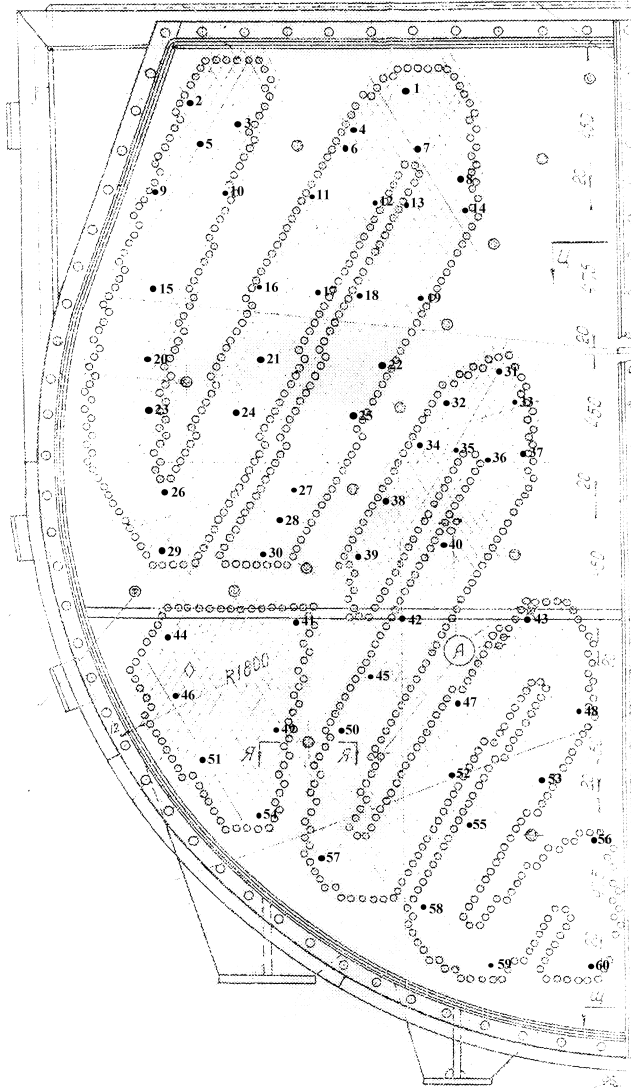
$$\frac{\partial}{\partial x}(\beta\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta\rho vv) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\beta\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\beta\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \beta \frac{\partial p}{\partial y} - \beta\dot{m}v - \beta F_v$$

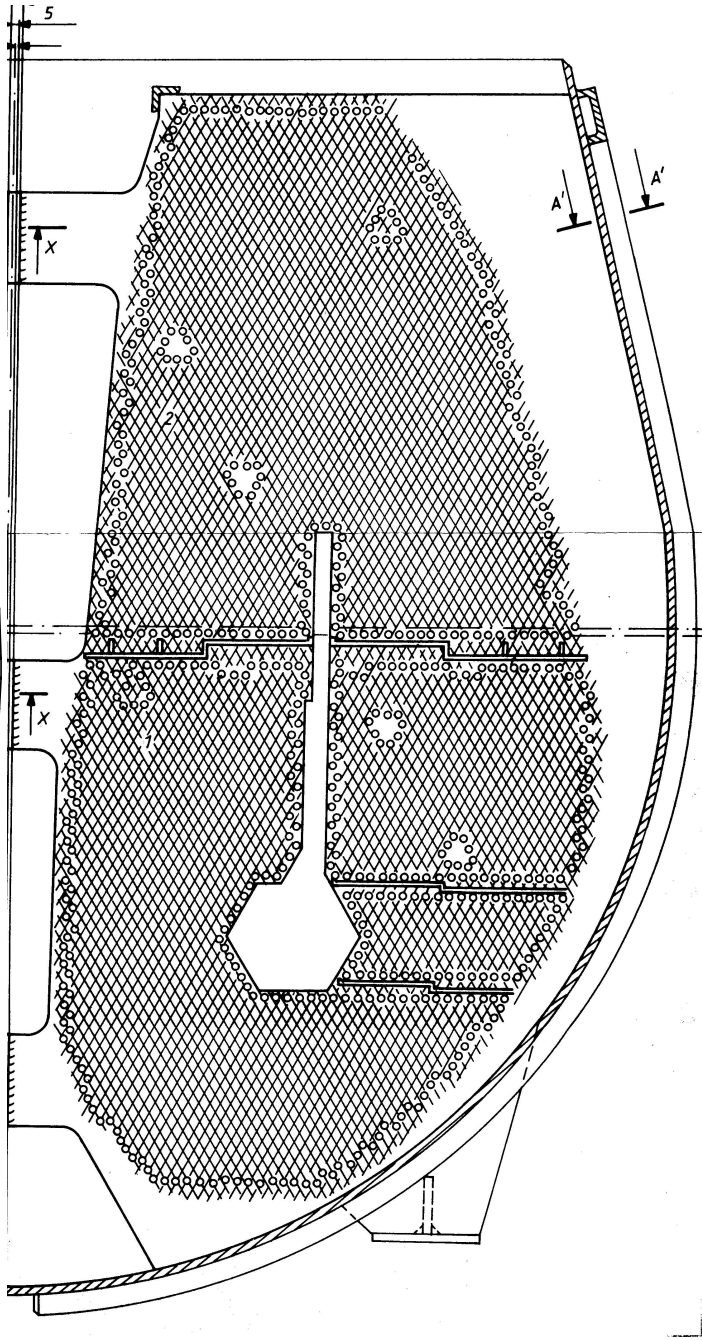
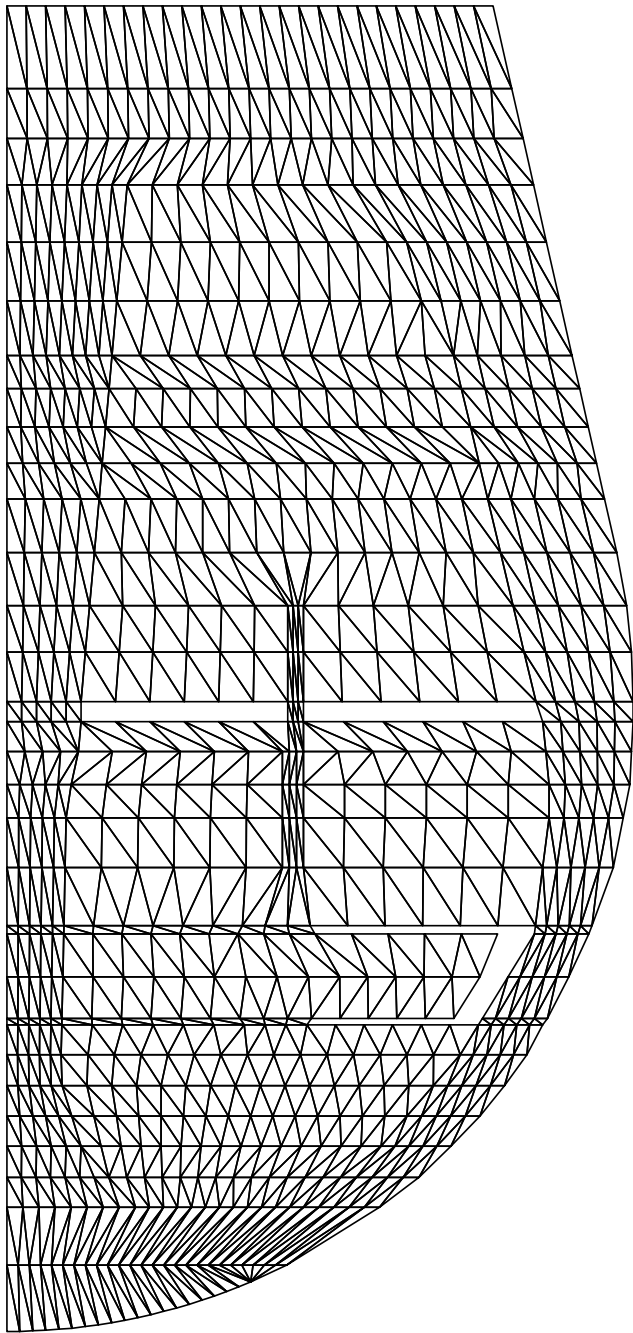
Bilans składnika

$$\frac{\partial}{\partial x}(\beta\rho u c_g) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta\rho v c_g) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\beta\rho D_a c_g \frac{\partial c_g}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\beta\rho D_a c_g \frac{\partial c_g}{\partial y}\right)$$

Parametry cieplno-przepływowe i geometryczne skraplacza bloku 50 MWe.

Parametr	Wielkość liczbowa
Strumień pary	140 t/h
Strumień wody chłodzącej	8000 m <sup>3</sup> /h
Temperatura wody chłodzącej na wlocie	24°C
Ciśnienie pary na wlocie do skraplacza	9582 Pa
Prędkość wody chłodzącej w rurach	1,57 m/s
Stężenie gazów inertnych	414 ppm
Liczba rur w pęku (I bieg, II bieg)	7160 szt. (3640, 3520)
Długość rur	6,58 m
Średnica zewnętrzna rury	24 mm
Grubość ścianki rury	1 mm
Podziałka rur	32 mm







# Dane geometryczne wymiennika ciepłowniczego

Tablica 1

L.p.	Nazwa		Łuszczyk	Wkład
1	Ciśnienie obliczeniowe	(MPa)	-0,1/0,3	2,5
2	Max. ciśnienie robocze	(MPa)	0,3	2,5
3	Temperatura obliczeniowa	(°C)	250	150
4	Max. temperatura robocza ścianki	(°C)	250	150
5	Ciśnienie próbne	(MPa)	0,39	3,38
6	Pojemność	(m <sup>3</sup> )	67,4	33,2
7	Medium		Para wodna	Woda gorąca
8	Ilość biegów		1	2
9	Powierzchnia wymiany ciepła	(m <sup>2</sup> )	3680	
10	Ilość u-rurek	(szt.)		2060
11	Wymiar rurek	(Ø x g [mm])		25 x 1,5
12	Długość odcinków prostych	(m)		11,2
13	Materiał rurek			St 35.8 I







23/08/2013



23/08/2013



23/08/2013



23/08/2013



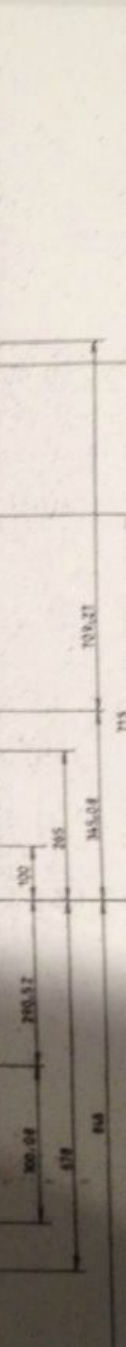
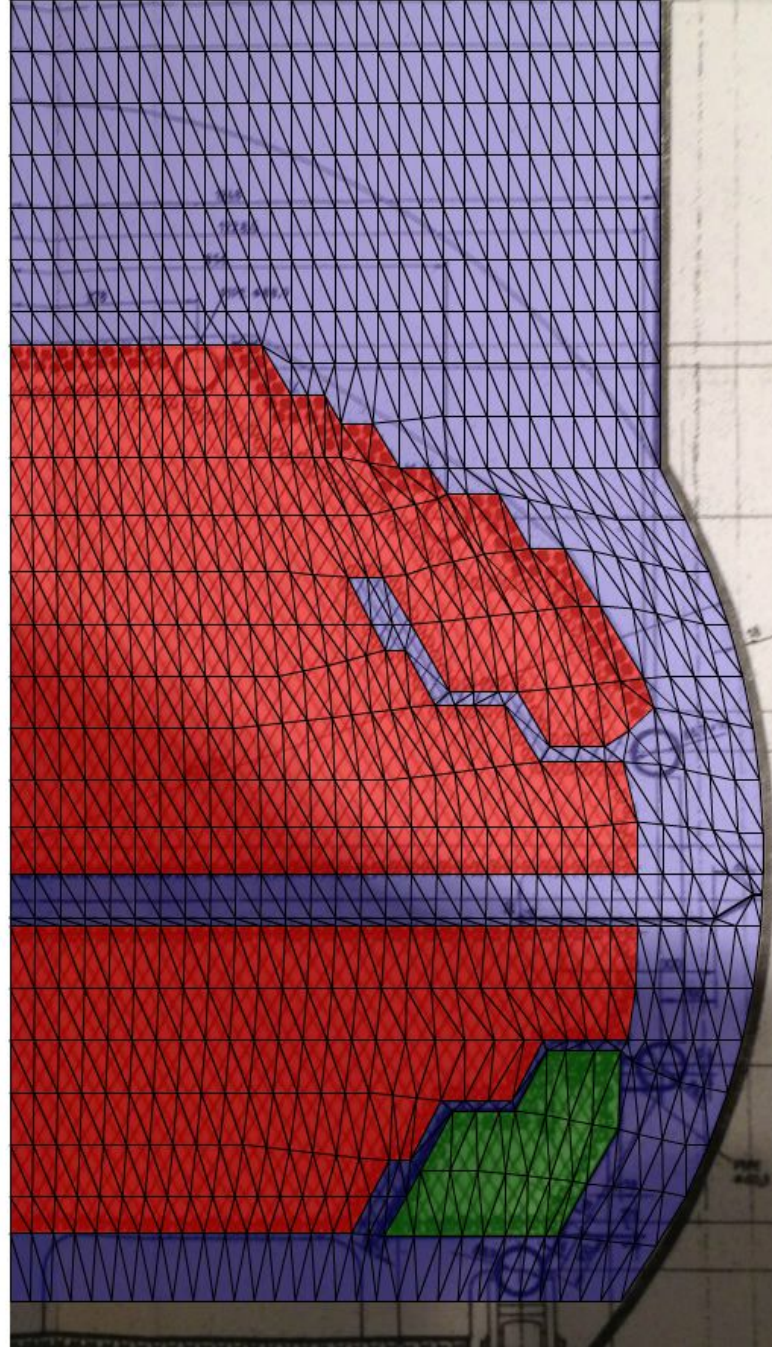
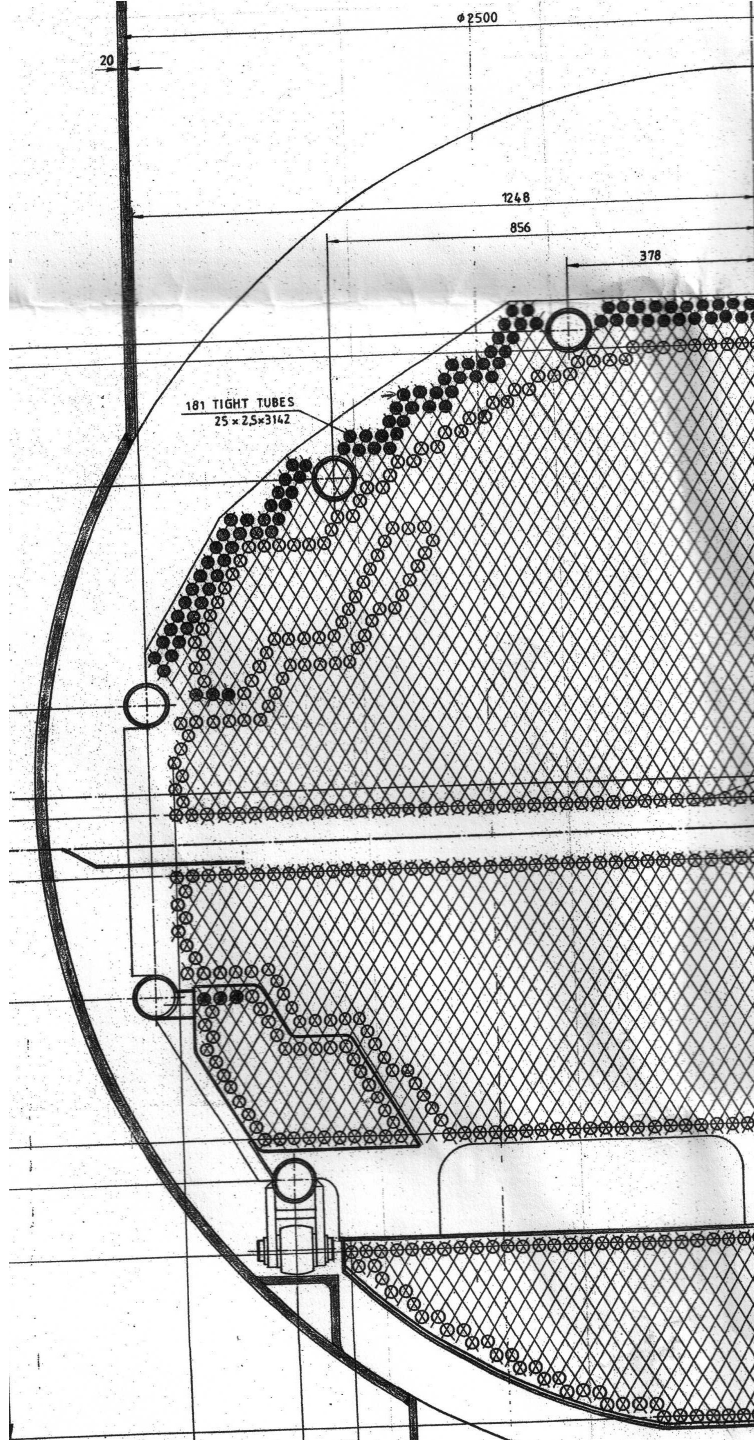
23/08/2013

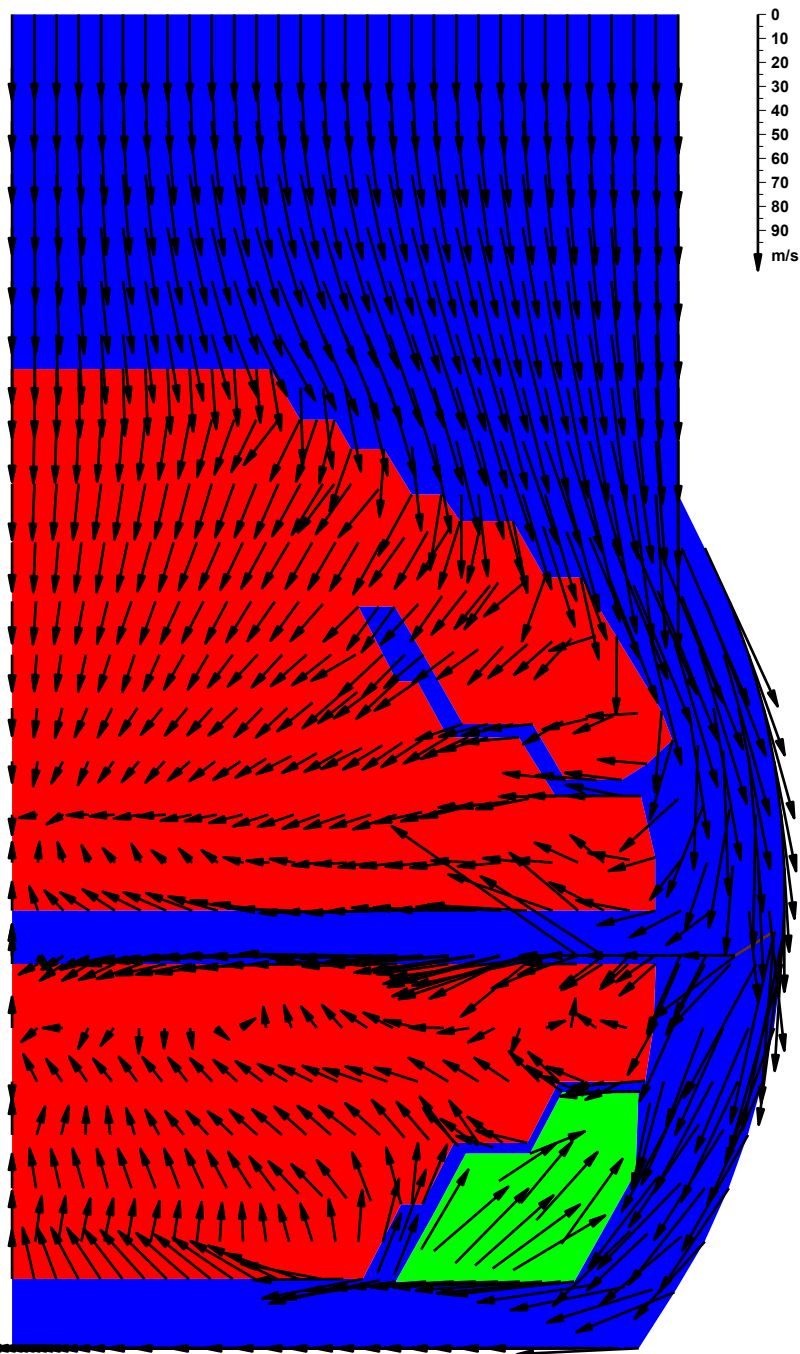




Widok rurek wymiennika przy przegrodzie.

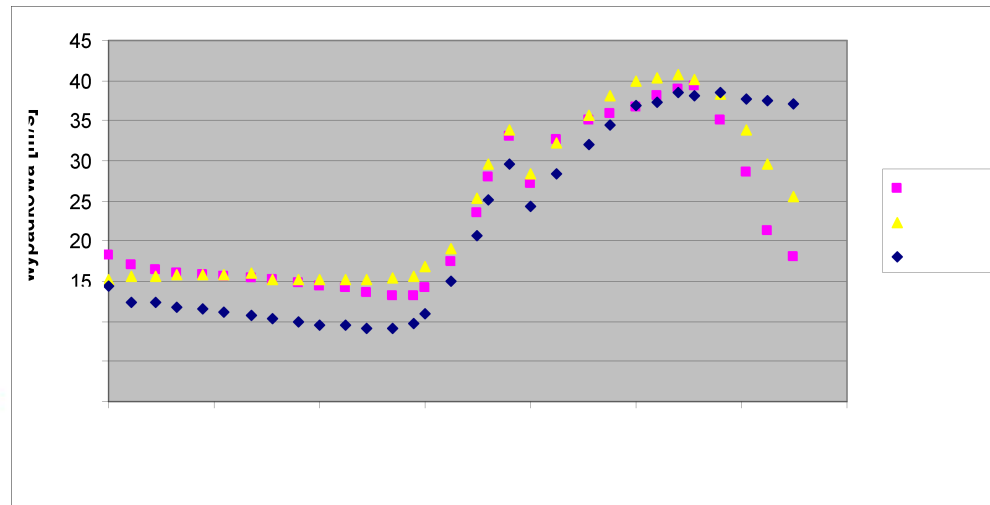
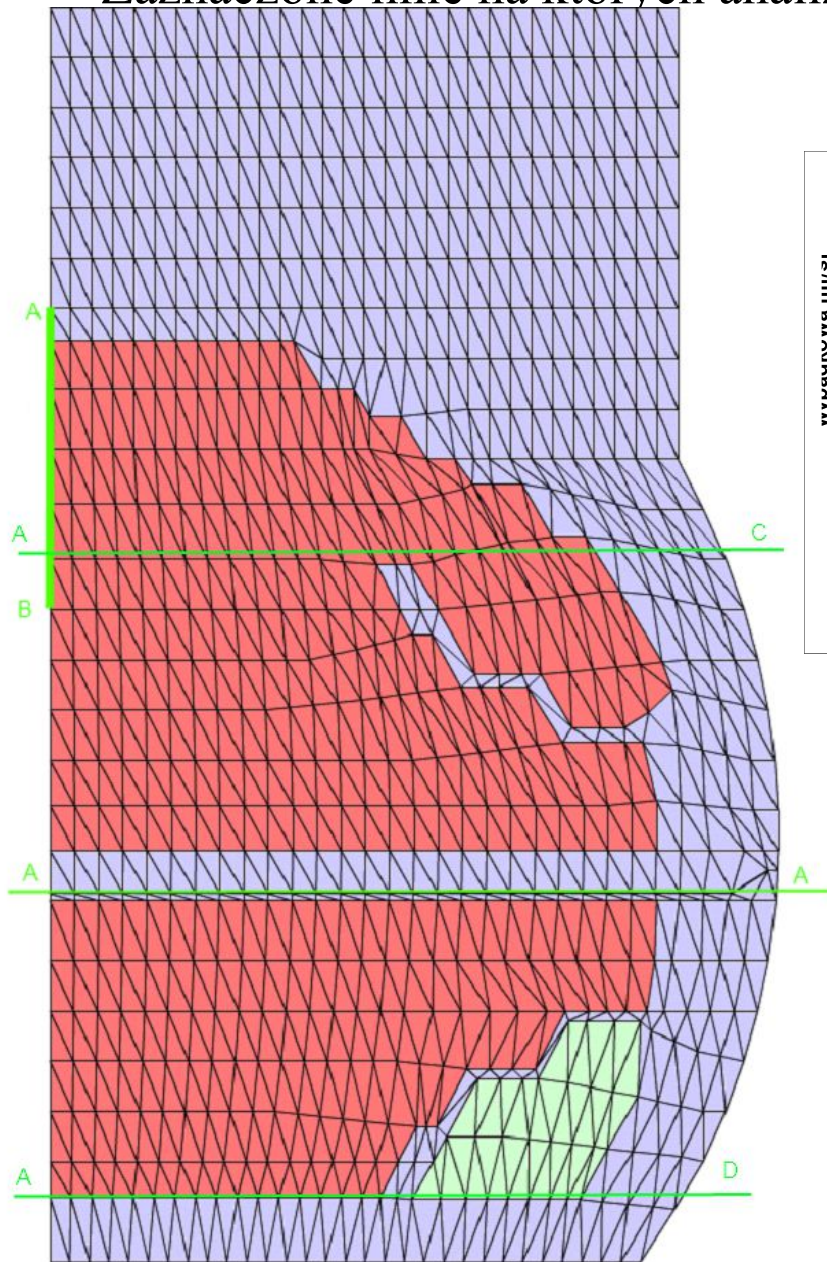




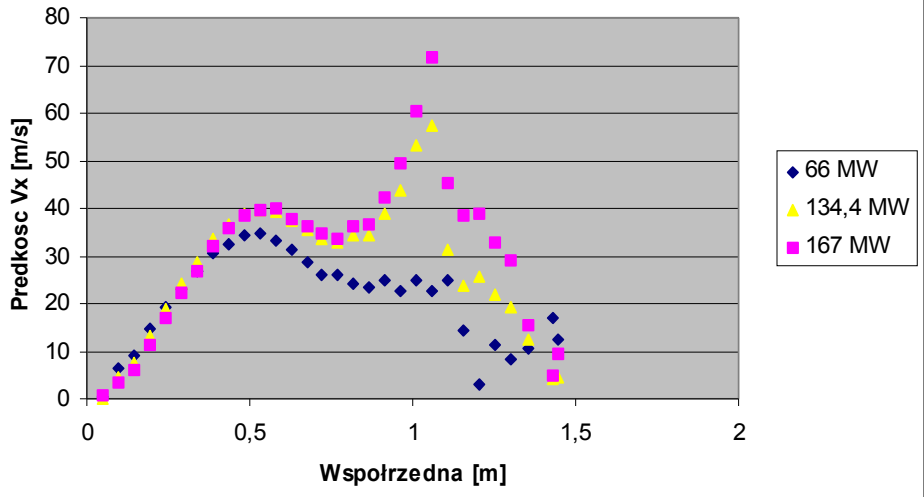


Wektory prędkości pary w wymienniku przy mocy cieplnej 167 MW

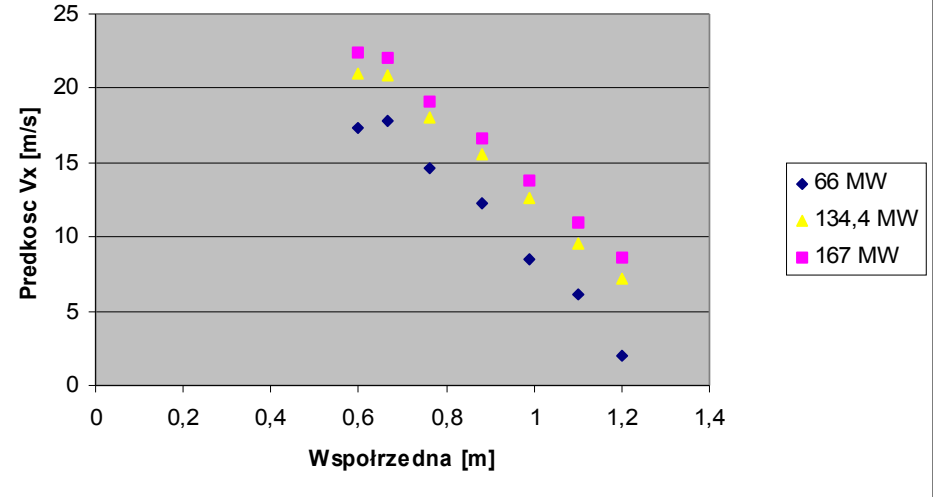
# Zaznaczone linie na których analizowane są wartości prędkości



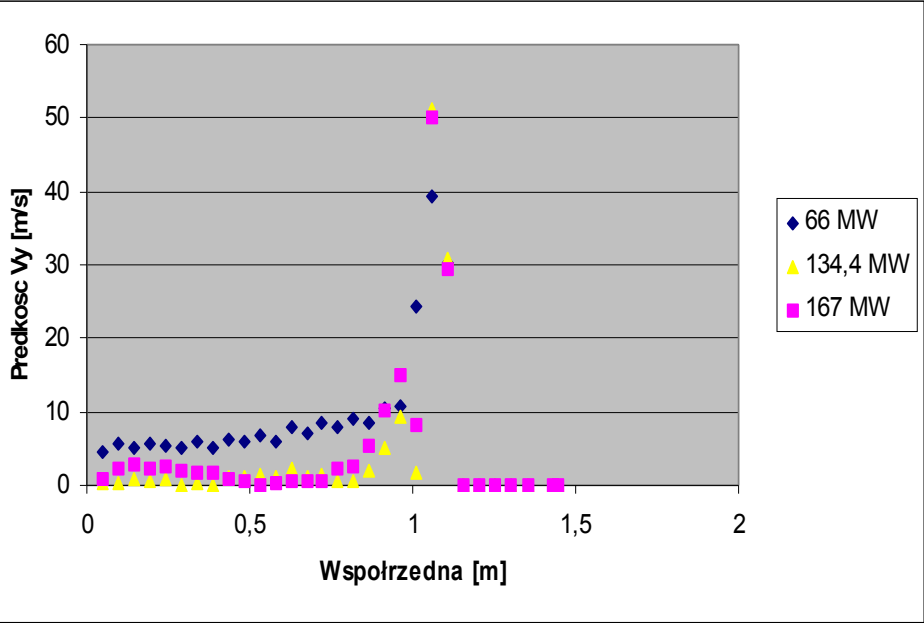
Prędkość wypadkowa pary w przekroju A-D



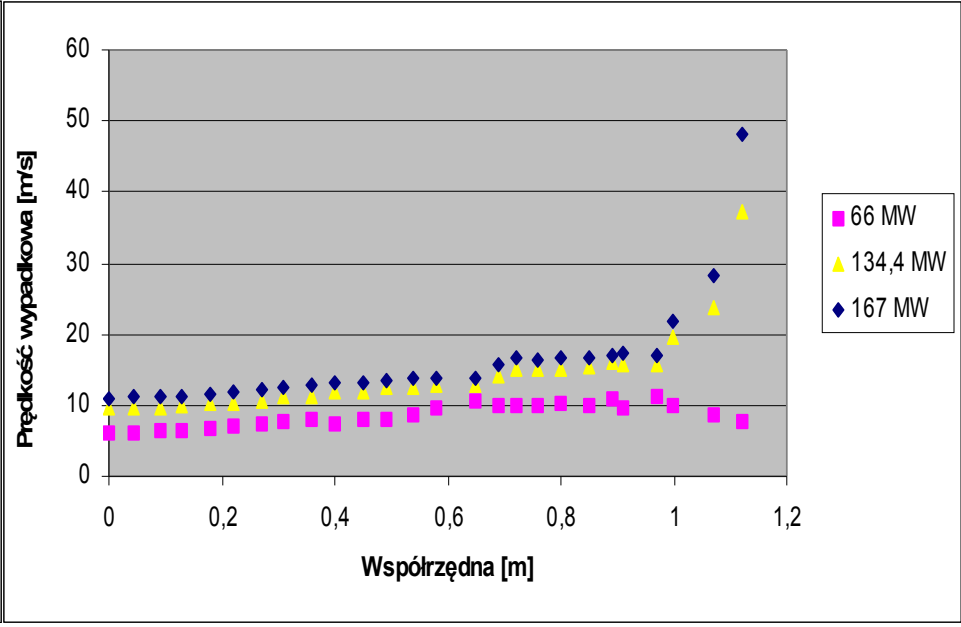
Składowa prędkości pary  $V_x$  w przekroju A-A



Składowa prędkości pary  $V_x$  w przekroju A-B



Składowa prędkości pary  $V_y$  w przekroju A-A



Prędkość wypadkowa pary w przekroju A-C.



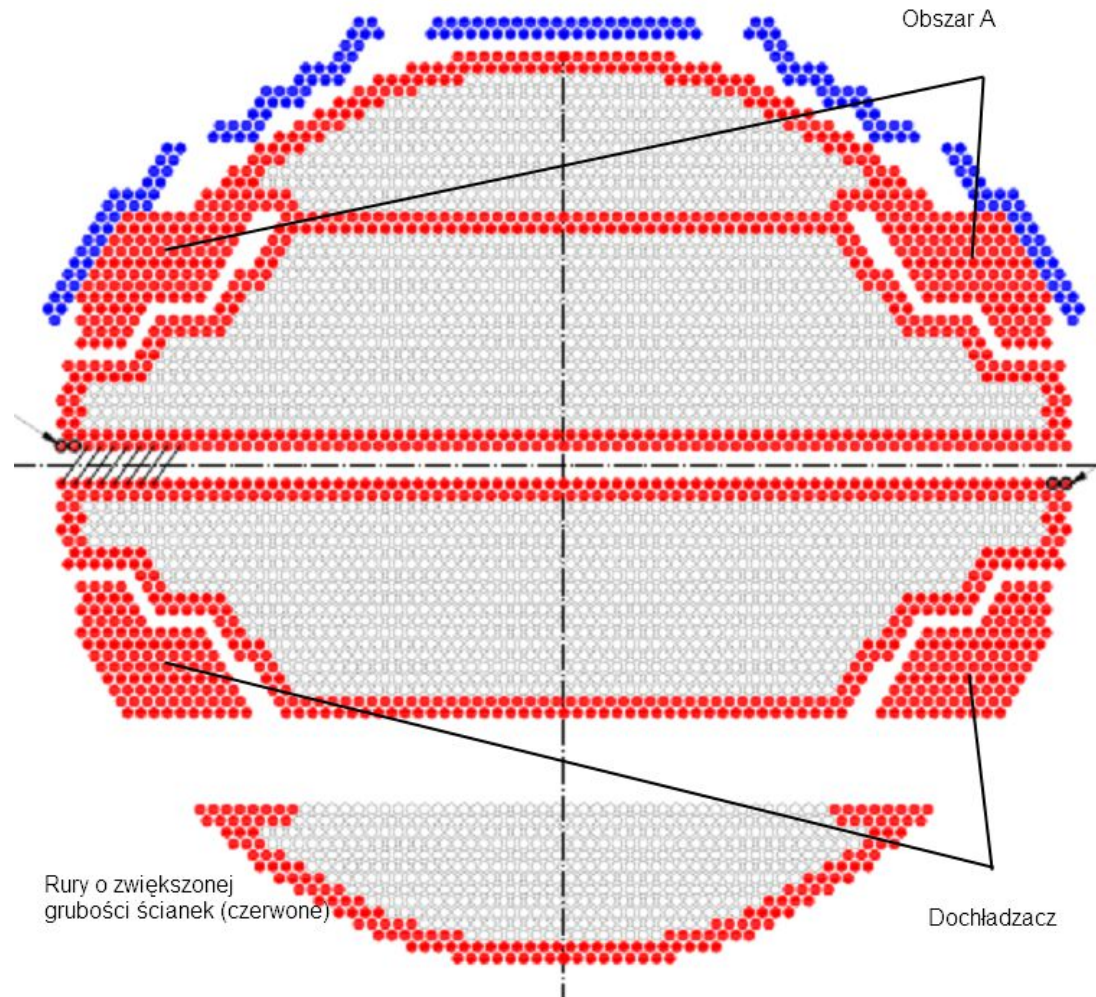
Zdj. Widok podpór wymiennika ciepłowniczego przed modernizacją.



Zdj. Wycięcie części podpór po modernizacji, zwiększające pole przekroju przepływu pary



# Podsumowanie i wnioski



Proponowane zwiększenie grubości ścianek rur w wymienniku ciepłowniczym.

W wyniku obserwacji podczas demontażu rur w wymienniku można wyciągnąć dalsze wnioski:

- należy przedłużyć rury ochraniające pęk (tzw. płotek) do dna sitowego, aby zabezpieczyć rury w pęku pomiędzy dnem sitowym, a pierwszą podporą rur;
- wydłużenie rur zabezpieczających w przeciwną stronę wydaje się niecelowe ponieważ zjawiska uszkodzeń płaszcza wymiennika prawdopodobnie zostaną przemieszczone w dalsze położenie, ponadto wystąpienie rur zabezpieczających zmniejsza przekrój przepływu pary pod wlotem, zwiększając jej prędkość, co jest zjawiskiem niekorzystnym;
- w celu zmniejszenia dławienia pary należy dodatkowo usunąć materiał przegród podporowych wymiennika w górnej części ponad siatką owietru, zwiększając pole przekroju dla przepływającej pary;
- nie zaobserwowano uszkodzeń rur w części łuków, zarówno dla łuków o mniejszych i większych promieniach.