

Wymiana ciepła podczas wrzenia

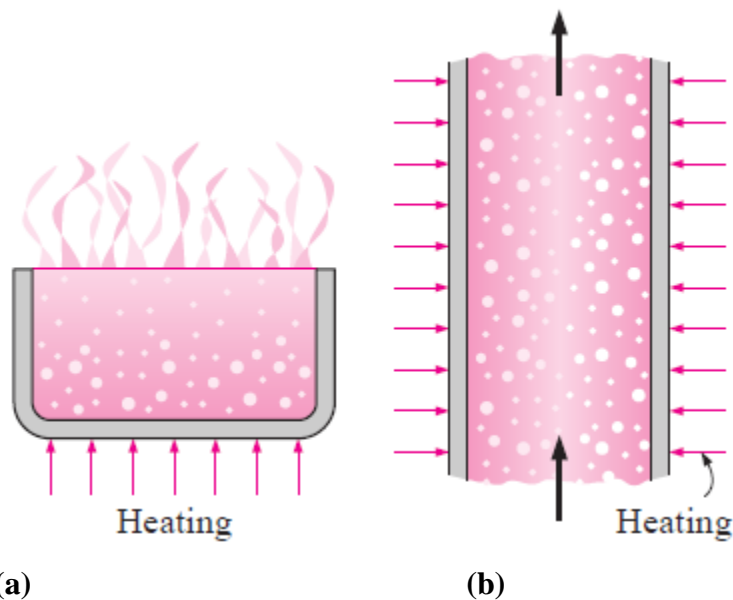
1. Wstęp

Wrzenie ma miejsce m.in.: w kotłach parowych, wytwornicach pary, chłodziarkach parowych. Ponieważ podczas wrzenia pochłaniane są bardzo duże ilości ciepła i intensywność pochłaniania ciepła jest bardzo wysoka, zjawisko wrzenia jest wykorzystywane podczas chłodzenia wielu urządzeń, np.: reaktorów jądrowych, silników raketowych, magnesów nadprzewodzących.

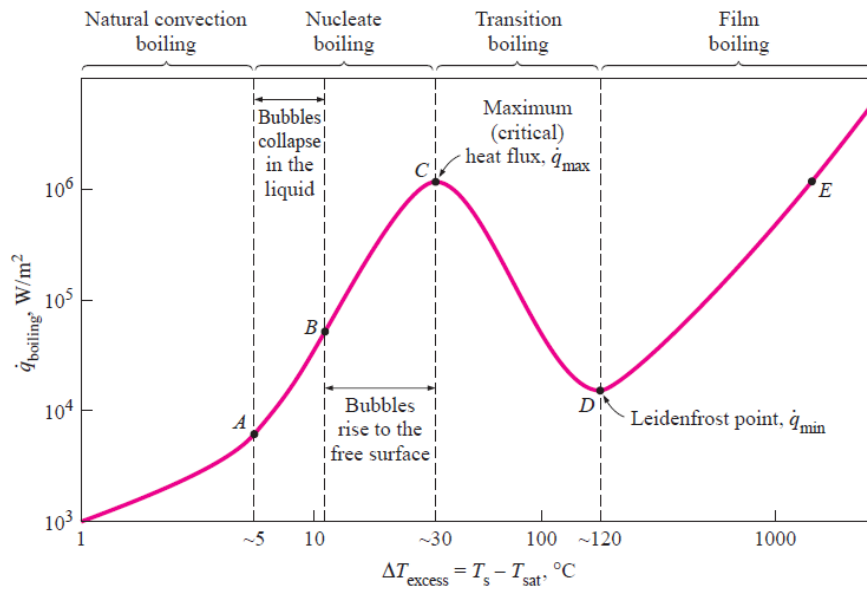
Współczynnik wnikania ciepła podczas wrzenia może być ponad 1000 razy większy niż podczas konwekcji w cieczy.

Typy wrzenia:

- wrzenie objętościowe
- wrzenie powierzchniowe
- wrzenie z konwekcją swobodną (pool boiling)
- wrzenie z konwekcją wymuszoną
- wrzenie pęcherzykowe
- wrzenie błonowe

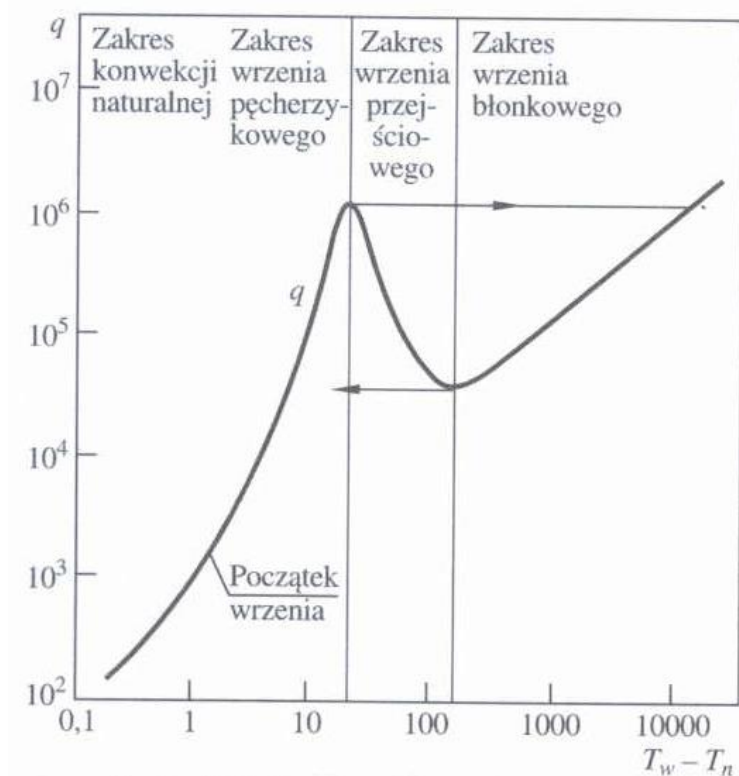


Rys. 1.1. Wrzenie z konwekcją swobodną (a) i wrzenie z konwekcją wymuszoną (b).



Rys. 1-2. Typowa krzywa wrzenia swobodnego w dużej objętości. Podczas wyznaczania krzywej regulowana jest temperatura powierzchni wymiany ciepła.

Od punktu **D** w prawo, powierzchnia wymiany ciepła jest całkowicie pokryta warstwą pary, która utrudnia przepływ ciepła do wrzącej cieczy.

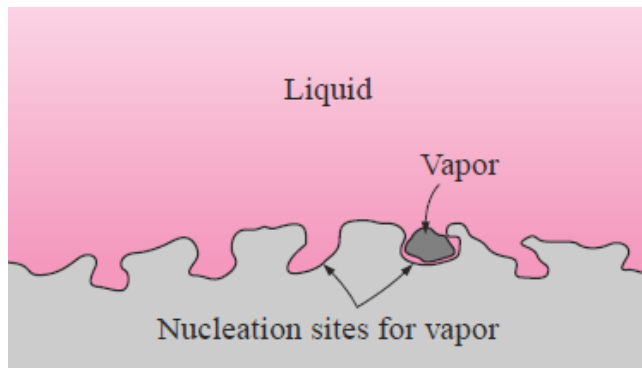


Rys. 1-3. Zakresy wrzenia wody (swobodnego, w dużej objętości) pod ciśnieniem atmosferycznym i w temperaturze nasycenia T_n dla ogrzewanego elektrycznie drutu platynowego. Podczas wyznaczania krzywej regulowana jest moc grzejnika.

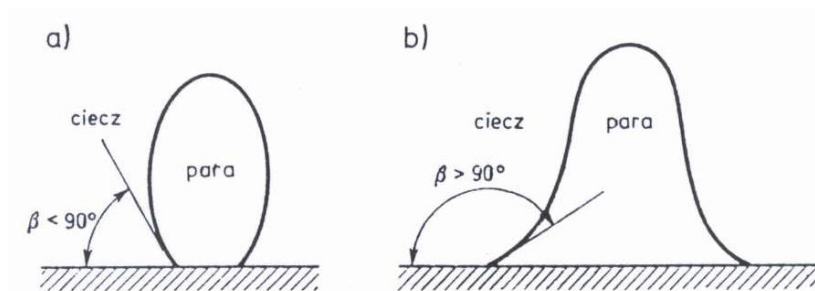
Pęcherzyki pary powstają na powierzchni grzejnej, gdy spełnione są następujące warunki:

- powierzchnia ma temperaturę wyższą od temperatury nasycenia,
- na powierzchni grzejnej występują tzw. zarodki pary.

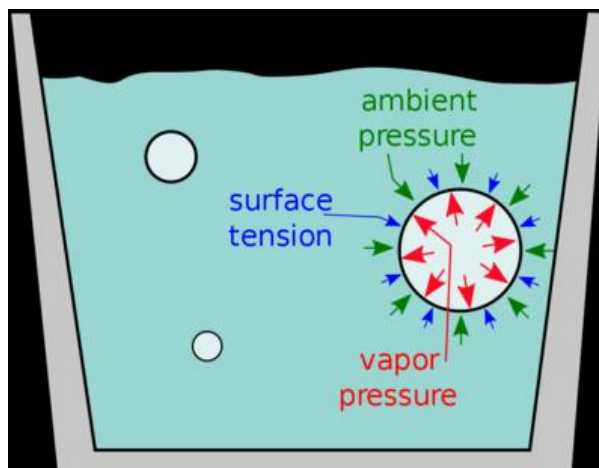
Zarodkami pary są nierówności (wgnębienia) występujące na powierzchni grzejnej, których promień jest zbliżony do promienia krytycznego pęcherzyka pary.



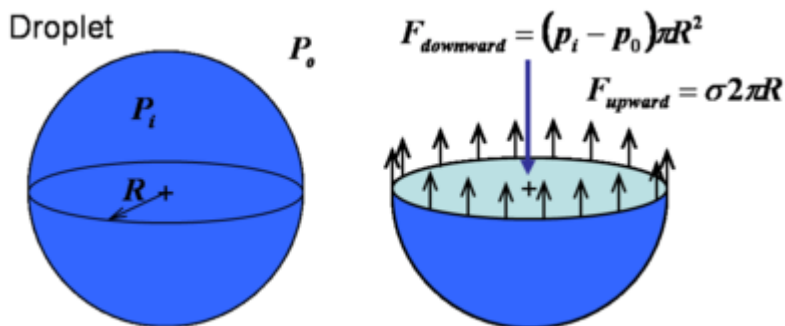
Rys. 1-4. Zarodki pary we wgłębieniach powierzchni.



Rys. 1-5. Pęcherzyki pary na powierzchni grzejnej a) zwilżanej, b) nie zwilżanej przez ciecz.



Rys. 1-6. Pęcherzyk pary w cieczy - rozkład sił.



Rys. 1-7. Siły działające na granicy pęcherzyk pary – ciecz. Na rysunku p_i to ciśnienie pary wewnątrz pęcherzyka a p_0 to ciśnienie cieczy na zewnątrz pęcherzyka.

Warunek istnienia pęcherzyka pary w cieczy jest następujący

$$p_p > p_c \quad (1.1)$$

gdzie p_p jest ciśnieniem pary w pęcherzyku, a p_c jest ciśnieniem cieczy.

Warunek (1.1) wynika stąd, że na granicy pęcherzyka i cieczy działają w cieczy siły napięcia powierzchniowego dążące do zmniejszenia wielkości pęcherzyka. Pęcherzyk nie zmienia swojej wielkości wtedy, gdy pomiędzy siłami wynikającymi z nierówności (1.1) i siłami napięcia powierzchniowego istnieje równowaga

$$(p_p - p_c)\pi R^2 = 2\pi R\sigma \quad (1.2)$$

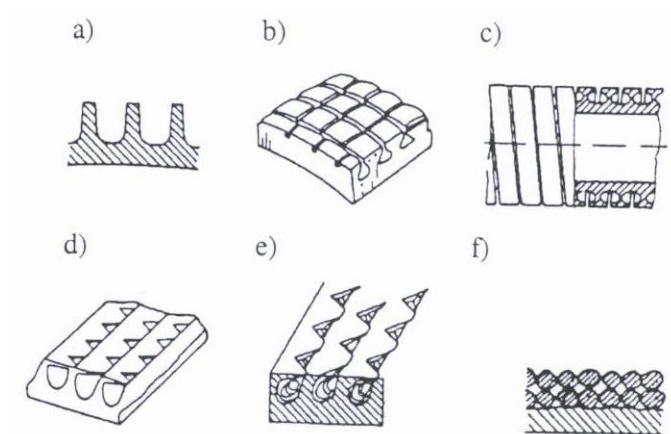
czyli

$$p_p - p_c = \frac{2\sigma}{R} \quad (1.3)$$

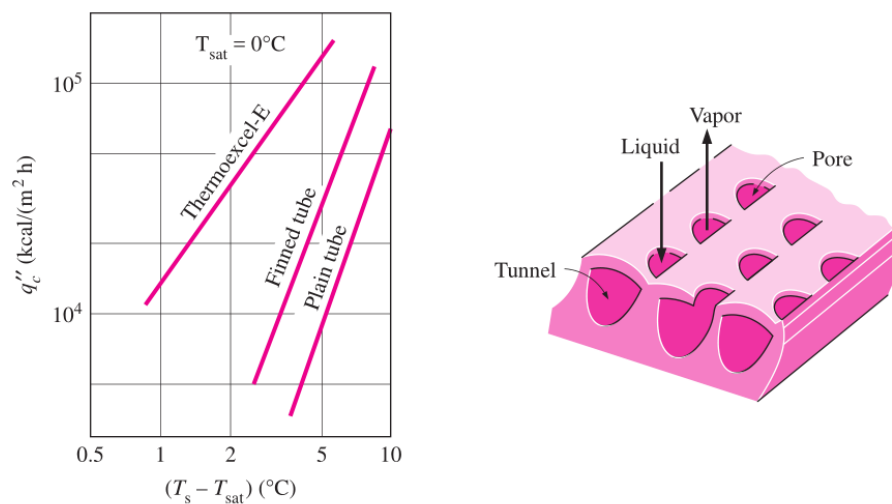
gdzie: R – promień pęcherzyka, σ [N/m] – napięcie powierzchniowe.

Promień pęcherzyka wyznaczony z równości (1.3) nazywany jest promieniem krytycznym zarodka pary.

Pęcherzyki pary wytwarzane na powierzchni grzejnej mogą przemieszczać się na zewnątrz cieczy (temperatura cieczy w pewnej odległości od powierzchni grzejnej jest równa temperaturze nasycenia) lub skraplać się wewnątrz cieczy (temperatura cieczy w pewnej odległości od powierzchni grzejnej jest niższa od temperatury nasycenia). Gdy pęcherzyki pary zanikają w cieczy, wrzenie nazywane jest wrzeniem lokalnym.



Rys. 1-8. Przykłady powierzchni intensyfikujących wrzenie: a) rury niskożebrowane, b) rury ze zmodyfikowanymi żebrami ECR, c) rury ze zmodyfikowanymi żebrami Gewa-TX, d) rury z porami tunelowymi Thermoexcel-E, e) rury z porami tunelowymi JK-2, f) rury z powłokami kapilarno-porowatymi High Flux.



Rys. 1-9. Wpływ rodzaju powierzchni na współczynnik wnika-
nia ciepła dla wrzącego Freonu-12.

2. Wnikanie ciepła podczas wrzenia z konwekcją swobodną (pool boiling)

Zależność *Rohsenowa* na gęstość strumienia ciepła dla swobodnego wrzenia pęcherzykowego (pool boiling)

$$q \left[\frac{W}{m^2} \right] = \mu_l r \left[\frac{g (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{pl} \Delta T}{C_{sf} r Pr_l^n} \right)^3 \quad (2.1)$$

$n = 1,0$ dla wody

$n = 1,7$ dla innych cieczy

Współczynnik C_{sf} zależy od rodzaju cieczy oraz rodzaju i stanu powierzchni.

Temperaturą odniesienia dla parametrów termofizycznych jest temperatura nasycenia, T_s .

μ - współczynnik lepkości dynamicznej, $Pa \cdot s$

r - ciepło parowania, J/kg

g - przyspieszenie ziemskie, m/s^2

σ - współczynnik napięcia powierzchniowego, N/m

ΔT - różnica temperatur ścianki, T_w , oraz nasycenia, T_s , K

Indeks l oznacza, że dana wielkość dotyczy cieczy o temperaturze nasycenia.

Indeks v oznacza, że dana wielkość dotyczy pary nasyconej suchej.

Przykładowe wartości współczynnika C_{sf} dla wody

mosiądz	0,0060
miedź	0,0068
miedź polerowana	0,0130
platyna	0,0130
stal nierdzewna	
- wytrawiona chemicznie	0,0133
- polerowana mechanicznie	0,0132
- punktowo pokryta teflonem	0,0058

Chapman A.J.: Fundamentals of Heat Transfer. Macmillan,
New York, 1987

Kombinacja plyn/powierzchnia	Współczynnik C_{sf}
woda/miedź	0.013
woda/nikiel	0.006
woda/platyna	0.013
woda/mosiądz	0.006
woda/stal nierdzewna polerowana mechanicznie	0.0132
woda/stal nierdzewna chemicznie wytrawiona	0.0133
woda/stal nierdzewna szlifowana i polerowana	0.080
CCl_4 /copper	0.013
Benzene/Chromium	0.0101
n-Pentane/Chromium	0.015
Ethyl alcohol/Chromium	0.0027
Isopropyl alcohol/copper	0.0025
n-Butyl alcohol/copper	0.003

Napięcie powierzchniowe dla wody można wyznaczać ze wzoru

$$\sigma [N/m] = 0,2358 \left(1 - \frac{T[K]}{647,15} \right)^{1,256} \times \left[1 - 0,625 \left(1 - \frac{T[K]}{647,15} \right) \right] \quad (2.2)$$

Maksymalna wartość gęstości strumienia ciepła dla wrzenia pęcherzykowego

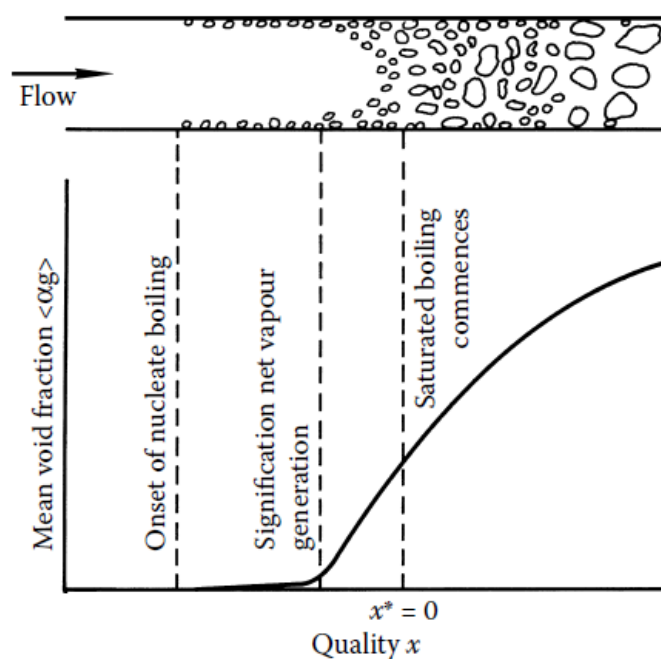
$$q_{\max} = C_m r \rho_v^{1/2} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \quad (2.3)$$

gdzie:

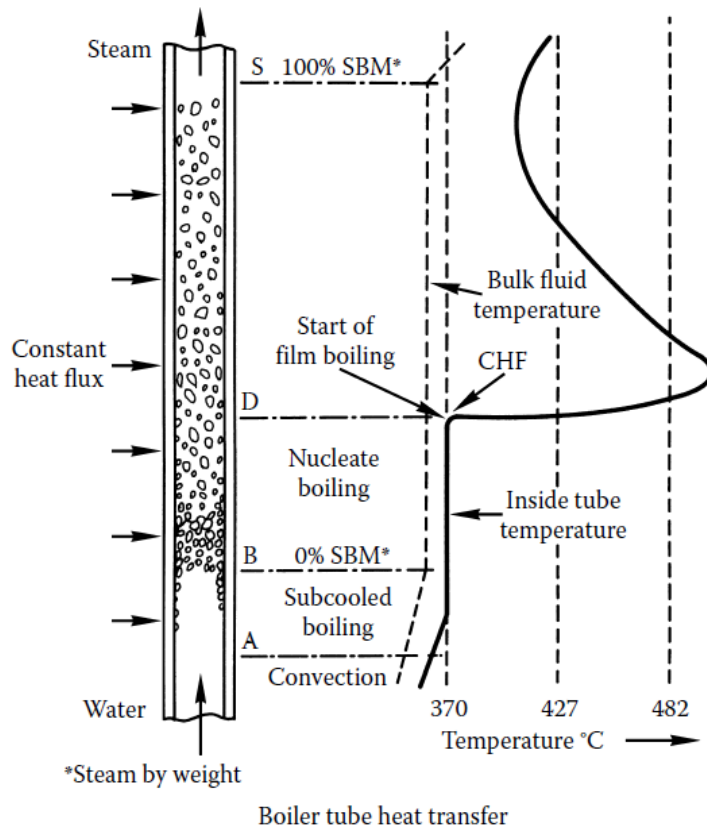
$C_m = 0,149$ dla dużej powierzchni poziomej

$C_m = 0,116$ dla cylindra o średnicy znacznie większej niż promień krytyczny zarodka pary

3. Wymiana ciepła podczas wrzenia przy przepływie wymuszonym w kanałach

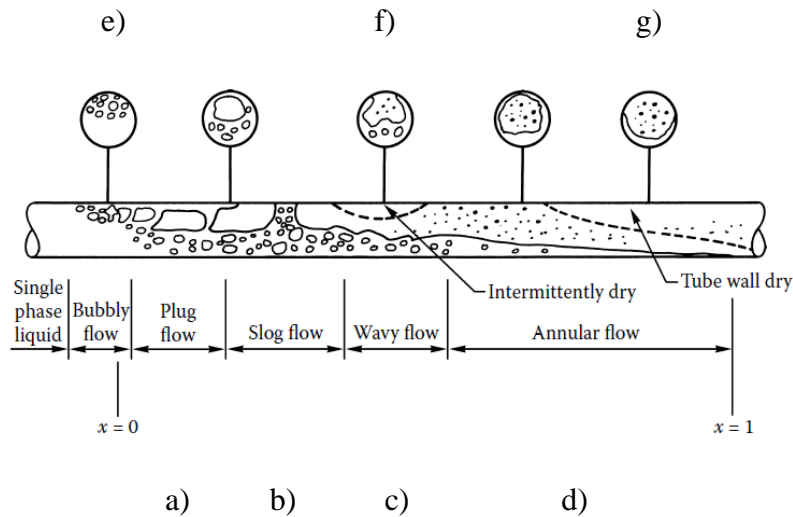


Rys. 3-1. Zmienność udziału objętościowego pary wzdłuż ogrzewanego kanału.



Rys. 3-2. Profile temperatury w pionowej rurze parownika.

CHF – critical heat flux, SBM – steam by weight percentage



Rys. 3-3. Rodzaje przepływów w poziomej rurze parownika.

Przepływ: a) tłokowy (bez mieszania warstw cieczy); b) z dużymi pęcherzami pary przedzielonymi cieczą; d) pierścieniowy; f) nieregularnie suchy

W przypadku wrzenia z przepływem wymuszonym często temperatura cieczy na wlocie do wymiennika ciepła jest niższa od temperatury nasycenia (np. w kotłach przepływowych).

Jens i Lottes zalecają następującą korelację dla obszaru niedogrzejanej wody (o temperaturze niższej niż temperatura nasycenia) przy konwekcji wymuszonej podczas wrzenia na powierzchni ze stali nierdzewnej lub niklu

$$q \left[\frac{MW}{m^2} \right] = 2,56 \cdot 10^{-6} e^{0,645 p [bar]} (T_w - T_s)^4 \quad (3.1)$$

Korelację (3.1) można stosować dla wody, dla ciśnień 0,7 – 17,2 MPa i gęstości strumienia ciepła mniejszej od 12,5 MW/m².

Przegrzanie cieczy, przy którym rozpoczyna się wrzenie pęcherzykowe, można określić za pomocą równania Davisa i Andersona

$$\Delta T_{pe} = T_{wpe} - T_s = \frac{8\sigma T_s q}{\lambda_l \rho_v r} \quad (3.2)$$

gdzie:

T_{wpe} – temperatura ścianki, przy której rozpocznie się wrzenie pęcherzykowe, °C

T_s – temperatura nasycenia, °C

q – gęstość strumienia ciepła pochłanianego przez ciecz podczas wrzenia, W/m²

λ_l - przewodność cieplna cieczy dla temperatury T_s

ρ_v - gęstość pary dla temperatury nasycenia, T_s

r – ciepło parowania, J/kg

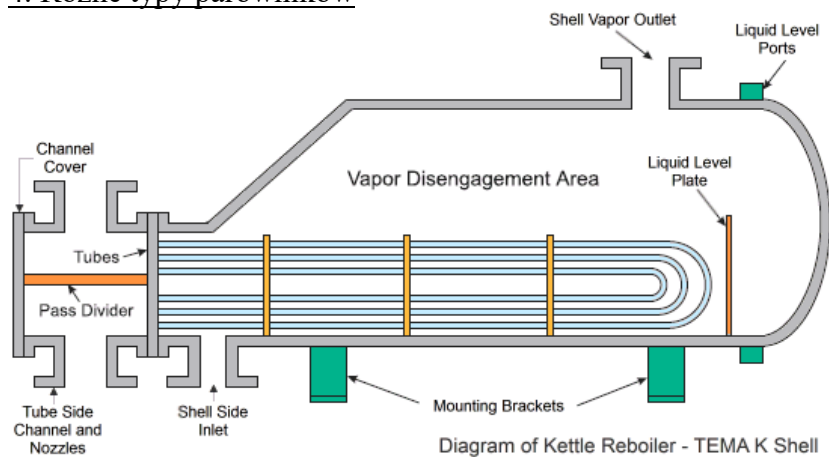
Strumień ciepła dla wrzenia pęcherzykowego wody przy przepływie wymuszonym można obliczyć z równania Berglesa i Rohsenowa

$$q \left[\text{W/m}^2 \right] = 1120 p^{1,156} (1,8 \Delta T_{pe})^{2,16/p^{0,0234}} \quad (3.3)$$

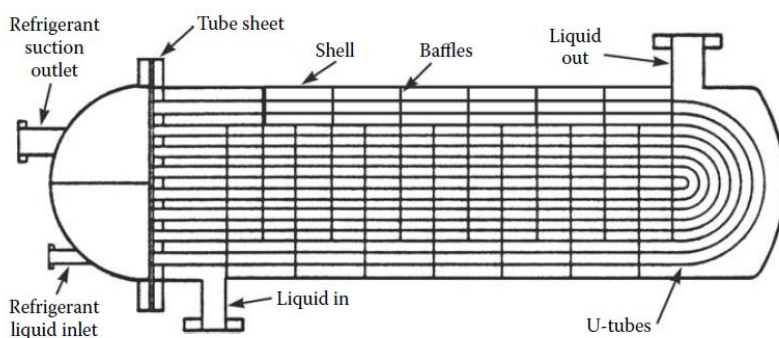
gdzie ciśnienie wrzenia p należy podstawiać w bar. Równanie (3.3) może być wykorzystywane do obliczeń projektowych.

W obszarze w pełni rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego prędkość wrzącego czynnika przemieszczającego się kanałem nie wpływa na gęstość strumienia wnikającego ciepła. Wartość tego strumienia jest zbliżona do tej uzyskiwanej podczas swobodnego wrzenia w dużej objętości cieczy.

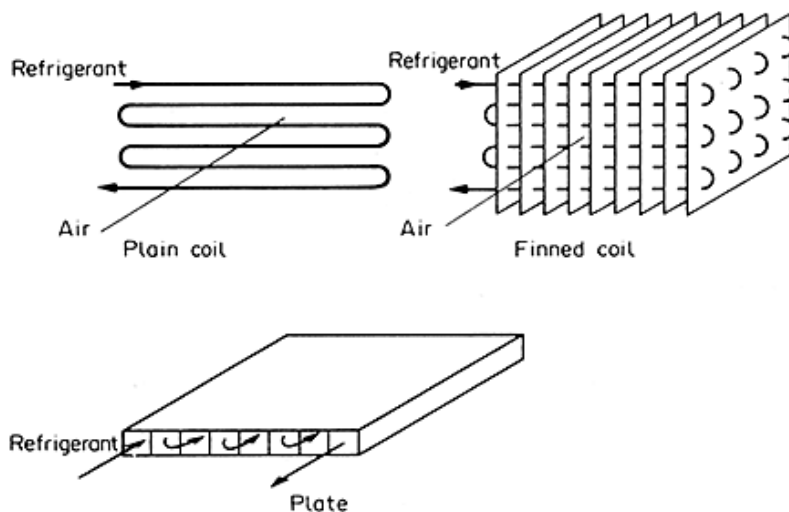
4. Różne typy parowników



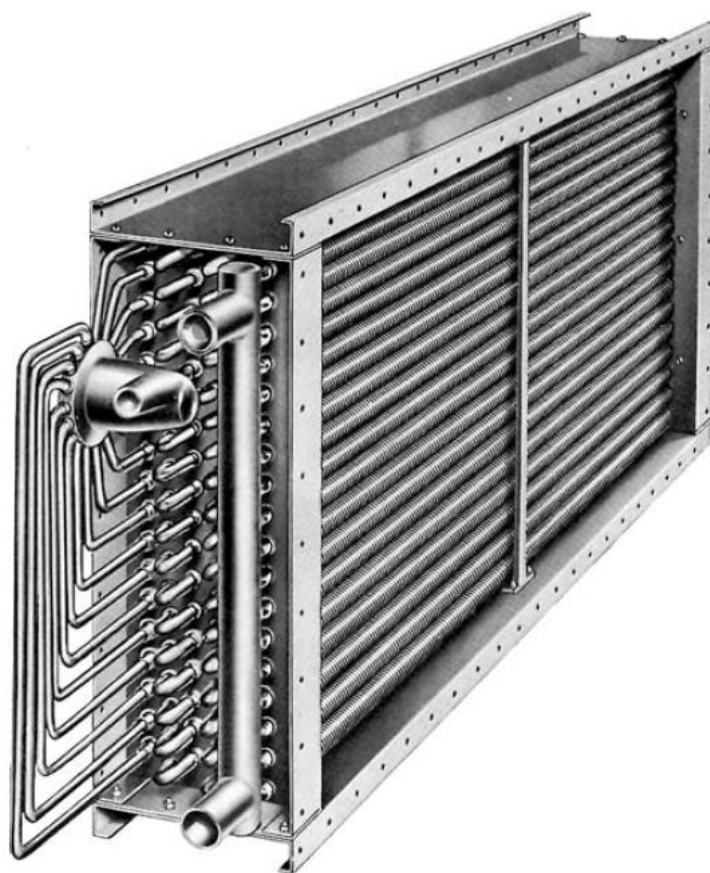
Rys. 4-1. Płaszczowo-rurowa wytwornica pary.



Rys. 4-2. Parownik chłodnica cieczy



Rys. 4-3. Parowniki chłodnicze.



Rys. 4-4. Parownik – chłodnica powietrza.