

Krzysztof Szalucki

## W PARZE Z PARĄ, CZYLI SYSTEMY PARY I KONDENSATU PRAWIE BEZ TAJEMNIC.

### 1. Co to jest para, a co zwykliśmy parą nazywać?

W niniejszym artykule używając słowa para nie będę miał na myśli pary w znaczeniu dwa, dwoje itp., a przede wszystkim parę wodną. Wydaje mi się, że jedynym wyjątkiem od powyższego może być tytułowa gra słów „w parze z parą”, ale kto wie, być może pojawią się inne pary. Dociekliwego czytelnika zachęcam do tych poszukiwań, niemniej jednak mam nadzieję, że podczas lektury poniższego tekstu pozna również wiele ciekawych zjawisk, informacji, a może także znajdzie wskazówki lub odpowiedzi na nurtujące pytania. Liczę, że na końcu artykułu każdy będzie mógł powiedzieć: „Jestem w parze z parą ☺”.

Rozpoczynając omawianie systemów pary i kondensatu przede wszystkim musimy uściślić, co definiujemy pojęciem pary wodnej.

Para wodna jest to niewidoczna - rysunek 1 - i bezwonna faza gazowa wody, wytwarzana na skutek dostarczenia takiej ilości ciepła do wody, które prowadzi do zmiany jej stanu fizycznego skupienia z ciekłego w gazowy. Podczas tego procesu cząsteczka wody odrywa się od cieczy i przechodzi do pary. Dla danej temperatury ustala się równowaga cieplna zależna od ciśnienia wywoływanego przez cząstki pary wodnej w mieszaninie gazów (ciśnienie cząstkowe pary wodnej), niezależnie od ciśnienia innych gazów w mieszaninie.



Rysunek 1. Wytwornica pary w czasie produkcji pary – wytwarzanej pary nie widać!

Proces odparowania jest odwracalny! Jeżeli od pary będziemy odbierać wcześniej dostarczone ciepło, to nastąpi jej kondensacja (czyli skraplanie), aż do momentu w którym para wodna całkowicie przejdzie w postać ciekłą. Powstałą w ten sposób ciecz nazywamy kondensatem (skroplinami).

W tym miejscu koniecznie trzeba zwrócić uwagę, że bardzo często używamy nazwy para opisując zjawiska, które parą z punktu widzenia zjawisk fizycznych nie są. Nie chcę nikogo tu namawiać, żeby korygował swoje tradycyjne nazewnictwo w tym względzie, ale zależy mi, aby zrozumiałe były różnice między tym, co w technice i fizyce parą jest, a co nie.

Bardzo często w chłodniejszy poranek nad taflą jeziora widząc mgiełkę – rysunek 2 – mówimy: „jezioro paruje”. Jednak to co widzimy nie jest parą! Oczywiście para wodna jest składnikiem powietrza atmosferycznego. Pamiętajmy jednak, że para - nawet jeżeli jest zmieszana z powietrzem - jest gazem niewidocznym. Cóż więc widzimy nad taflą jeziora? Mgiełka, to bardzo małe kropelki wody zawieszone w powietrzu. Nagrzane w ciągu dnia powietrze nad powierzchnią wody uległo nasyceniu parą. Spadająca nad ranem temperatura powietrza wilgotnego powoduje, że ilość pary wymagana dla nasycenia powietrza maleje. Tym samym rozpoczyna się proces kondensacji nadmiaru pary wodnej zawartej w powietrzu.



Rysunek 2. Mgiełka nad taflą jeziora to nie para!

Stojąc w nagrzanej po gorącym prysznicu łazience mówimy: „znowu lustro zaparowało”. To co widzimy na lustrze, to nie para. Osadziły się na nim kropelki wody, które skondensowały w pobliżu na skutek niższej temperatury jego powierzchni. Maksymalna ilość pary (niewidocznej), która może być zawarta w powietrzu zmalała na skutek obniżenia się temperatury w pobliżu lustra, nadwyżka wilgoci uległa kondensacji i to daje efekt, który właśnie widzimy.

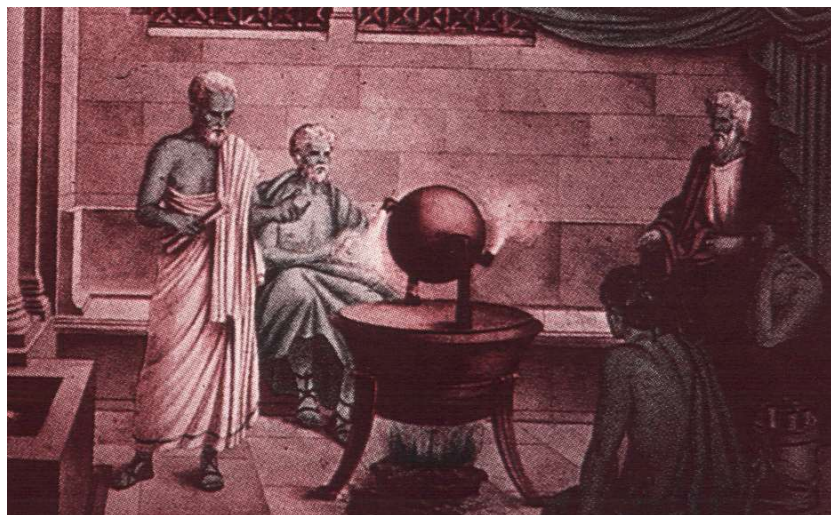


Rysunek 3. Skoro widać obłoczek - to nie jest para

Wnętrze włączonego czajnika z wrzącą wodą po pewnym czasie wypełnia się parą. Patrząc na czajnik mówimy: „o leci już para”. Jednak to co widzimy jak wylatuje z czajnika już parą nie jest. Strumień pary opuszczający czajnik styka się z chłodniejszym powietrzem otaczającym ten czajnik i para ulega bardzo gwałtownej kondensacji, kropelki wody tworzą rodzaj mgiełki – rysunek 3.

## 2. Para wodna w ujęciu historycznym

Za pierwszy udokumentowany przypadek wykorzystania pary uznaje się uruchomienie ok. 100 lat p.n.e. przez Greka Hero z Aleksandrii urządzenia o nazwie aeolipile – rysunek 4. Urządzenie nie miało zastosowania praktycznego, raczej pokazowo-rozrywkowe. W dolnej części znajdowało się zamknięte naczynie częściowo wypełnione wodą. Woda w naczyniu podgrzewana za pomocą rozpalanego pod nim ogniska doprowadzana była do wrzenia, a następnie odparowywała. Para przez rurę wylotową trafiała do wnętrza obrotowo osadzonej kuli. Na kuli zainstalowane były dwie dysze wylotowe. Para pod ciśnieniem wylatywała przez dysze i na zasadzie reakcji wprawiała kulę w ruch obrotowy. Znaleziono zostały szkice urządzenia zaprojektowanego przez Hero z Aleksandrii, które przy wykorzystaniu pary umożliwiało otwieranie drzwi świątyni, niestety nigdy nie trafiono na ślad realizacji tego projektu.



Rysunek 4. Hero z Aleksandrii demonstruje działanie aeolipile – ok. 100 rok p.n.e.

Na następne dziewiętnaście stuleci para praktycznie została zapomniana. Owszem zdarzały się przypadki prób jej wykorzystania, lecz były nieporadne i wymagały nadmiernych nakładów energetycznych w stosunku do uzyskiwanych rezultatów. Za historyczny oraz przełomowy moment w dziejach zastosowania i wykorzystania pary uznaje się przekonstruowanie w 1763 roku przez Jamesa Watta podciśnieniowej maszyny parowej Newcomena w maszynę nadciśnieniową – rysunek 5.



Rysunek 5. Maszyna parowa Watt-Newcomen z 1763 roku (stan z 1929 roku) - Szkocja

Po raz pierwszy do napędu maszyny parowej wykorzystano parę o ciśnieniu przewyższającym ciśnienie atmosferyczne. Wcześniejsze konstrukcje wykorzystywały efekt kondensacji pary i powstania warunków próżni pod tłokiem, dzięki czemu wykonujący pracę ruch tłoka realizowany był przez oddziaływanie ciśnienia atmosferycznego. Wydawałoby się prosta zmiana sposobu zasilania, spowodowała ponad pięciokrotny wzrost sprawności maszyny parowej, który i tak pozostaje na bardzo niskim poziomie, nie przekraczającym kilku procent. Ten przełomowy moment uznano później za początek wieku pary. Wiek pary minął, jednakże para jest stosowana do dzisiaj i wszystko wskazuje na to, że będziemy ją wykorzystywać jeszcze przez wiele lat.

### 3. Podstawowe definicje wymagane dla zrozumienia tematu pary wodnej.

Niestety dla dobrego zrozumienia problematyki związanej z parą i kondensatem konieczne jest przyswojenie przynajmniej kilku definicji podstawowych pojęć, ze szczególnym uwzględnieniem tych z których będziemy korzystać w dalszej części opracowania.

#### Para nasycona

Para nasycona jest to para wodna (faza gazowa) pozostająca w równowadze termodynamicznej z wodą (fazą ciekłą). Przy zapewnieniu stałej temperatury, zwiększenie objętości przestrzeni, w której znajduje się para wodna, spowoduje odparowanie części wody i wypełnienie całej objętości bez obniżenia ciśnienia. Od tej właśnie cechy pary związanej z nasycaaniem wolnej przestrzeni pochodzi jej nazwa.

#### Para nasycona sucha

Para nasycona bez kropli wody w objętości jest nazywana parą nasyconą suchą.

#### Para nasycona mokra

Para nasycona mokra jest dwufazową mieszaniną pary nasyconej suchej i kropli wody wrzącej.

#### Stopień suchości

Stopień suchości pary  $x$  określa masową zawartość pary nasyconej suchej w parze mokrej – wzór 1.

$$x = \frac{m_{\text{pary\_nasyconej\_suchej}}}{m_{\text{pary\_nasyconej\_suchej}} + m_{\text{wody\_wrzqczq}}} \quad [-] \quad (1)$$

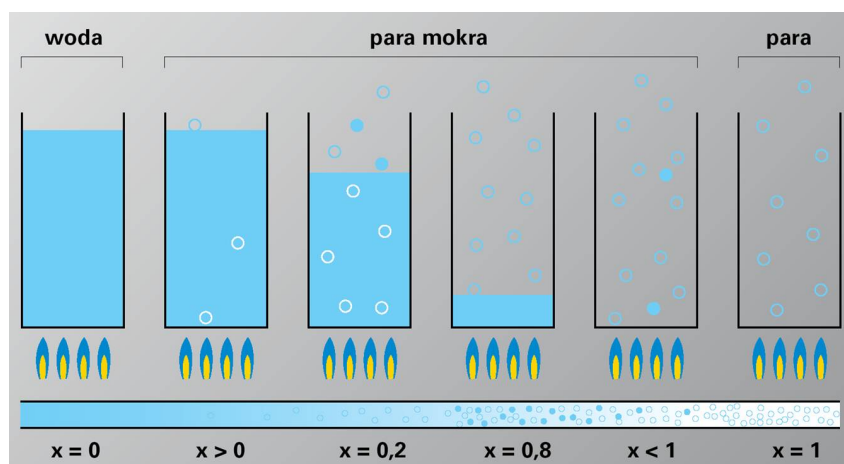
Punkty charakterystyczne to  $x=0$  (punkt wody wrzącej bez pęcherza pary) i  $x=1$  (punkt pary nasyconej suchej bez kropli wody). Stopień suchości pary nasyconej mokrej mieści się w przedziale od 0 do 1 – rysunek 6.

#### Para przegrzana

Para przegrzana jest to para o temperaturze wyższej niż temperatura nasycenia przy tym samym ciśnieniu, jest ona najczęściej uzyskiwana na skutek dostarczania ciepła do pary nasyconej suchej (np. w przegrzewaczu pary).

#### Entalpia (ciepło) parowania

Ilość ciepła, którą trzeba dostarczyć do 1 kg wrzącej wody ( $x=0$ ) dla całkowitego jej odparowania do stanu pary nasyconej suchej ( $x=1$ ), nazywamy entalpią parowania (ciepłem parowania).



Rysunek 6. Proces odparowania wody, a stopień suchości pary

## Entropia

Entropia jest termodynamiczną funkcją stanu, określającą kierunek przebiegu procesów spontanicznych w odosobnionym układzie termodynamicznym, inaczej też jest ona miarą nieuporządkowania układu. Być może dla części czytelników definicja ta jest całkowicie niezrozumiała, a przynajmniej niezrozumiałą jest sposób wykorzystania tak zdefiniowanej funkcji. W omawianym przez nas przypadku o zmianach entropii mówimy, gdy woda lub para wodna wymienia (przyjmuje lub też oddaje) ciepło z otoczeniem. Podczas podgrzewania wody lub pary ich stopień nieuporządkowania – czyli entropia – rośnie, podczas schładzania (również kondensacji) stopień nieuporządkowania maleje – czyli entropia maleje. Przyrosty entropii zależą od ilości dostarczonego (lub odebranego) ciepła i temperatury.

## Kondensat – skropliny

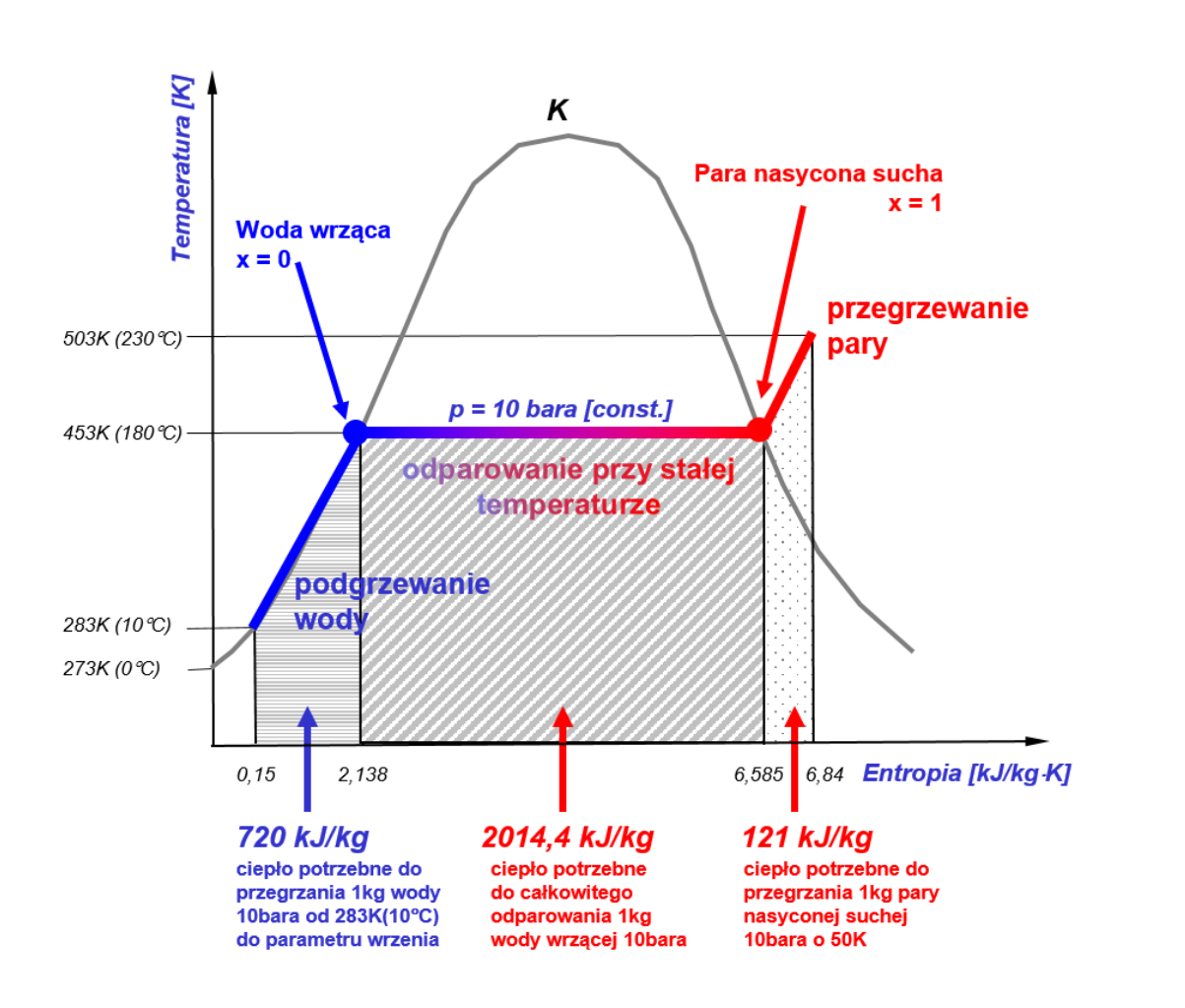
Kondensat (często nazywany skroplinami) to ciecz powstała w wyniku kondensacji (skraplania) pary wodnej. W trakcie kondensacji pary nasyconej suchej do stanu kondensatu wrzącego oddawane jest ciepło kondensacji równe ciepłu parowania.

## Para wtórna (z rozprężania)

Im wyższe ciśnienie tym więcej ciepła musimy doprowadzić do wody dla uzyskania parametru wrzenia. Tym samym przy obniżaniu ciśnienia wrzącego kondensatu powstaje nadwyżka ciepła, która będzie wykorzystywana do częściowego jego odparowania. Parę powstającą na skutek tego zjawiska nazywamy parą wtórną (lub parą z rozprężania).

## 4. Wytwarzanie pary wodnej – omówienie w oparciu o wykres T-s

Wykres T-s – rysunek 7 - czyli zależność temperatury od entropii dla wody i pary wodnej jest najczęściej wykorzystywanym wykresem, na podstawie którego omawiane jest wytwarzanie pary wodnej. Woda zimna (lub częściej wstępnie podgrzana) trafia do kotła lub wytwornicy pary, gdzie na skutek doprowadzania ciepła następuje jej podgrzewanie, aż do osiągnięcia punktu wrzenia  $x=0$ . Dalszy proces dostarczania ciepła skutkuje stopniowym odparowywaniem wody i jej przemianą w parę nasyconą mokrą, o coraz większym stopniu suchości. Na wykresie T-s obszar pary nasyconej mokrej rozciąga się pomiędzy krzywymi wody wrzącej  $x=0$  i pary nasyconej suchej  $x=1$ , poniżej punktu krytycznego K. Punkt krytyczny odpowiada temperaturze, powyżej której nie występuje faza ciekła wody (powyżej temperatury punktu krytycznego, niezależnie od ciśnienia, woda może być tylko w formie fazy gazowej). Temperatura punktu krytycznego wody wynosi  $374,2^{\circ}\text{C}$ , a odpowiadające mu ciśnienie krytyczne (ciśnienie pary nasyconej w temperaturze krytycznej)  $221,2$  bar.



Rysunek 7. Wykres T-s dla wody i pary wodnej

Para nasycona mokra z obszaru podkrytycznego, to mieszanina pary nasyconej suchej i wody wrzącej znajdująca się w równowadze. Doprowadzając do każdego kilograma wody wrzącej ilość ciepła równą entalpii (ciepłu) parowania doprowadzamy do całkowitej przemiany wody wrzącej w parę nasyconą suchą  $x=1$ . Jest niezwykle ważne, aby zapamiętać, że **cały proces odparowywania odbywający się przy stałym ciśnieniu realizowany jest przy stałej temperaturze**. Przy stałym ciśnieniu temperatura wody wrzącej, pary nasyconej mokrej i pary nasyconej suchej jest taka sama! Dopiero dalej doprowadzając ciepło już do pary nasyconej (w przegrzewaczu kotła) spowodujemy wzrost temperatury pary oraz wejście jej w obszar pary przegrzanej.

Dokładnie w taki sam sposób, tylko w odwrotnym kierunku następuje proces schładzania i kondensacji pary na skutek odbierania ciepła: oddanie ciepła przegrzania do uzyskania parametru pary nasyconej suchej, kondensacja pary - wejście w obszar pary mokrej, osiągnięcie punktu wody wrzącej i dalej schładzanie wody.

## 5. Dlaczego wykorzystujemy parę wodną?

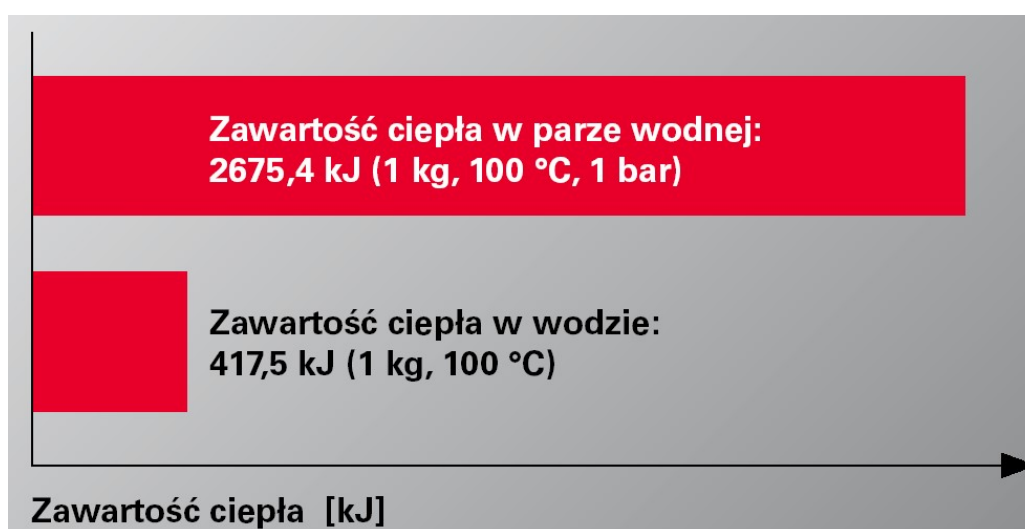
Mamy do dyspozycji wiele różnych nośników energii cieplnej stosowanych do celów technologicznych w zakładzie przemysłowym, są nimi: para, woda, powietrze, olej termalny; w celach grzewczych możemy również wykorzystywać energię elektryczną. Dlaczego wobec tego tak często stosujemy parę?

## 5.1 Przyjazna dla środowiska

Para wytwarzana jest z wody, surowca stosunkowo niedrogiego i obficie występującego w przyrodzie. Ewentualne wycieki pary lub nieznaczne przecieki kondensatu do atmosfery nie powodują zagrożeń zanieczyszczenia środowiska. Jedynie duże zrzuty kondensatu, charakteryzującego się kwaśnym odczynem, powinny być realizowane po neutralizacji, a także schłodzeniu.

## 5.2 Korzystny stosunek energii przenoszonej w jednostce masy

Para wodna przenosi duże ilości energii za pomocą stosunkowo niewielkiej masy. Dzięki temu, w porównaniu do innych nośników energii cieplnej, dużo mniejsze masowe strumienie pary są konieczne dla przesyłu takiej samej ilości energii cieplnej. Jeżeli porównamy entalpię (ciepło jednostkowe) pary wodnej nasyconej suchej i wody wrzącej przy tym samym ciśnieniu, możemy stwierdzić, że w jednostce masy stosując parę, możemy przenieść nawet do 6 krotnie więcej energii niż w przypadku wody – rysunek 8.



Rysunek 8. Porównanie ilości ciepła w jednostce masy pary i wody wrzącej przy ciśnieniu atmosferycznym

## 5.3 Wysoki współczynnik przenikania ciepła

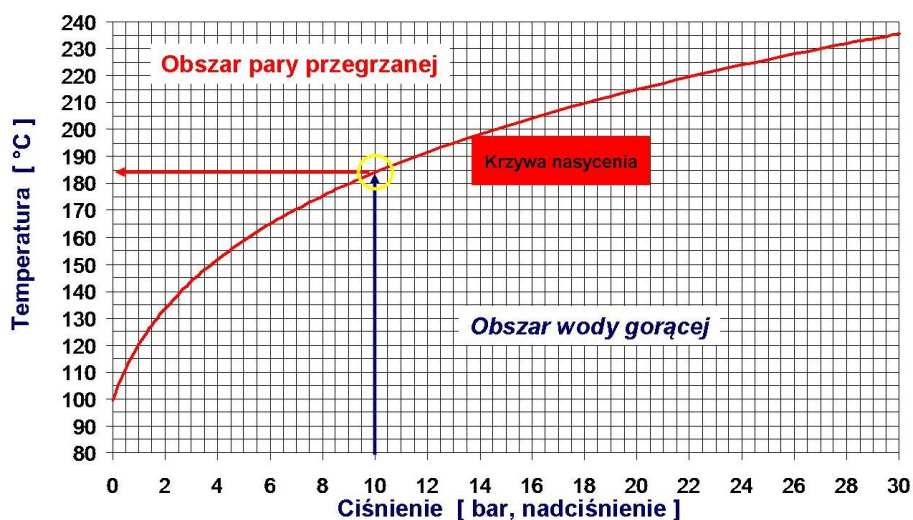
Wielkość powierzchni wymiany ciepła często decyduje o cenie urządzenia technologicznego czy też wymiennika ciepła. Ile razy większy jest uzyskiwany współczynnik przenikania ciepła tyle razy mniejsza może być powierzchnia wymiany. Współczynnik przenikania ciepła zależy od zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego, materiału i grubości powierzchni wymiany ciepła, zależy również od rodzaju czynnika ogrzewanego, ale co w przypadku pary jest najbardziej istotne w znacznym stopniu zależy od typu zastosowanego czynnika grzewczego. Przy zastosowaniu dokładnie takiego samego rozwiązania konstrukcyjnego powierzchni wymiany i takiego samego czynnika ogrzewanego, w przypadku wykorzystania pary wodnej nasyconej dla przeniesienia takiego samego strumienia ciepła będziemy potrzebowali prawie trzykrotnie mniejszej powierzchni wymiany ciepła niż w przypadku wody gorącej, a to najczęściej oznacza duże oszczędności inwestycyjne. Należy jednak zwrócić uwagę, że para parze nie równa i omówiona wyżej zaleta dotyczy tylko pary nasyconej, nie dotyczy zaś pary przegrzanej. Para przegrzana ma współczynnik przenikania ciepła około dziesięciokrotnie niższy niż para nasycona! Jest to jedną z przyczyn, dla których w zastosowaniach technologicznych nie wykorzystuje się pary przegrzanej. Niski współczynnik przenikania ciepła stanowi natomiast zaletę w przesyłach pary, gdyż oznacza niższe straty do otoczenia. Warto tu również wspomnieć, że para przegrzana ma inne zalety, które decydują o zastosowaniu jej w energetyce dla zasilania turbin parowych.

## 5.4 Stała współzależność ciśnienie – temperatura dla obszaru pary nasyconej

W obszarze pary nasyconej można dokładnie nastawić temperaturę pary przez zapewnienie odpowiedniej wartości jej ciśnienia. Stała współzależność ciśnienie / temperatura obowiązuje w całym zakresie nasycenia (woda wrząca, para mokra, para sucha). Wykres punktów współzależności temperatury od ciśnienia w warunkach nasycenia - rysunek 9 - tworzy krzywą nazywaną krzywą nasycenia. Ta cecha pary jest bardzo często wykorzystywana, gdyż dzięki niej możemy gwarantować temperaturę pary grzewczej w procesie technologicznym, bez skomplikowanego systemu pomiaru temperatury, po prostu utrzymując ciśnienie tej pary na odpowiednim poziomie.

Przykładowo dysponując parą nasyconą o ciśnieniu 10 bar(g) mamy zagwarantowaną jej temperaturę 184,07°C. Dla tej wartości ciśnienia temperatury wyższe będą odpowiadały obszarowi pary przegrzanej, a niższe wody gorącej. Inaczej: nie możemy w rurociągu pary nasyconej dokonać równoczesnego pomiaru ciśnienia 10 bar(g) i temperatury 160°C, ponieważ taki punkt pracy odpowiada punktowi z obszaru wody gorącej. Najczęściej w takim przypadku jedno z urządzeń pomiarowych (ciśnienia lub temperatury) działa nieprawidłowo.

Chyba, że !!!!..... jest taka możliwość, że poprawnie zmierzmy w rurociągu parowym parametry 10 bar(g) przy 160°C i nie będzie to woda gorąca. Takie zjawisko może wystąpić w przypadku wysokiej zawartości powietrza w parze, wówczas temperatura nasycenia mieszaniny odpowiada nie ciśnieniu całkowitemu mieszaniny, a ciśnieniu cząstkowemu pary nasyconej jako składnika tej mieszaniny gazów. Pamiętajmy jednak, że to zjawisko może wystąpić w martwych punktach rurociągów (przy braku przepływu) lub w niektórych odbiornikach pary, ale nie będziemy tego obserwować w częściach przepływowych rurociągów. Bardzo ważne jest dobre odpowietrzenie instalacji parowej szczególnie podczas jej rozruchu, ale także tak zwane automatyczne odpowietrzenie ruchowe stanowi istotny punkt w zakresie poprawnego projektowania instalacji parowych.



Rysunek 9. Współzależność temperatury od ciśnienia dla pary w warunkach nasycenia

## 5.5 Stała temperatura w czasie procesu oddawania ciepła w zakresie nasycenia

W wielu procesach technologicznych utrzymywanie stałej temperatury czynnika grzewczego jest podstawą dla wytworzenia wysokiej jakości produktu. Tylko dzięki parze nasyconej i jej omówionym wcześniej własnościom, możemy zapewnić dostarczanie dużych ilości ciepła do produktu bez zmiany temperatury czynnika grzewczego - rysunek 7 - w zakresie od pary suchej do wody wrzącej. Wszystkie pozostałe przepływowe czynniki grzewcze w miarę oddawania ciepła będą obniżały swoją temperaturę.

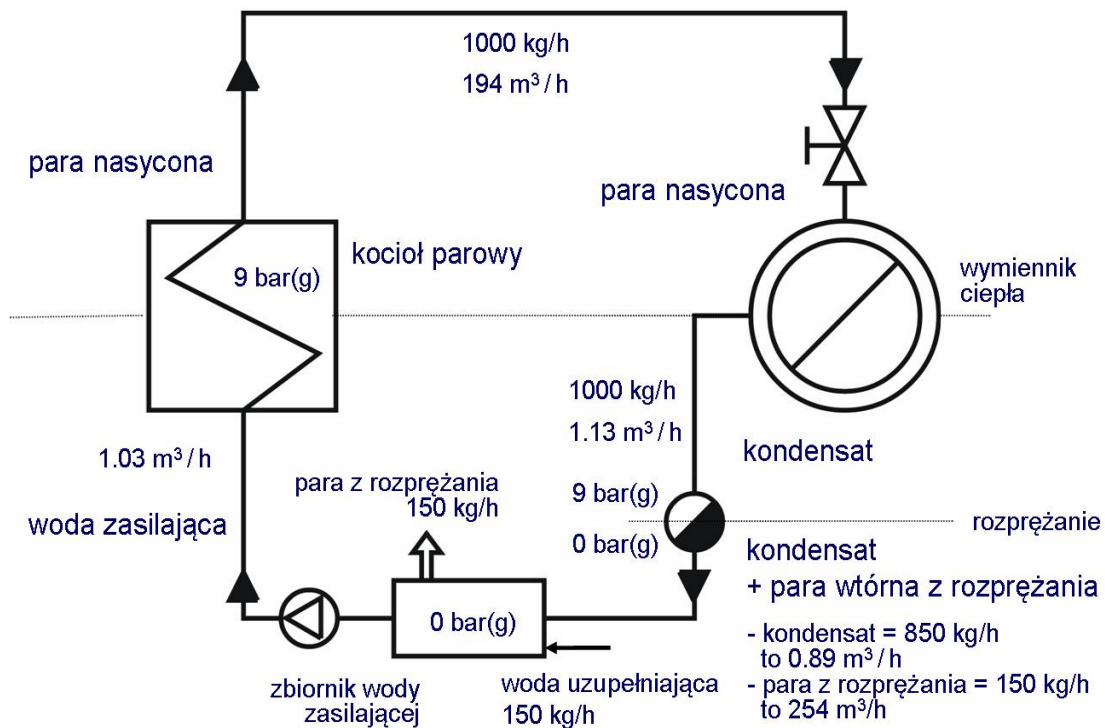
Można jeszcze wskazać cały szereg innych zalet pary nasyconej dla konkretnych specyficznych procesów technologicznych w przemyśle:

- czysta para nasycona stosowana w procesach sterylizacji instalacji technologicznych dzięki własności nasycania objętości wypełnia wszystkie zakamarki instalacji niszcząc niebezpieczne mikroorganizmy,
- rozpylenie pary w powietrzu zapewnia bardzo efektywne nasycenie go wilgocią,
- właściwej jakości parę możemy wtryskiwać bezpośrednio do produktu spożywczego dla podniesienia lub utrzymania jego temperatury bez zmian smaku tego produktu.

Podsumowując: zalety pary nasyconej jako nośnika energii w przemyśle, są na tyle znaczące i wartościowe, że mimo obaw związanych z nieznanymi zagadnieniami w zakresie pary i kondensatu jest ona ciągle i prawdopodobnie będzie w przyszłości bardzo często stosowana.

## 6. Podstawy w zakresie instalacji pary i kondensatu

Instalacja pary i kondensatu jest zazwyczaj trudniejsza w projektowaniu, wykonawstwie i użytkowaniu w porównaniu do instalacji z innymi nośnikami energii. Przyczyna tych trudności wynika przede wszystkim z równoczesnej obecności dwóch faz czynnika o odmiennych właściwościach. Faza gazowa (para) i ciekła (woda, kondensat) w większości przypadków występują jako mieszaniny o różnej zmiennej zawartości faz. Jedyną częścią instalacji, gdzie występuje przepływ jednofazowy (woda zasilająca) jest odcinek od wylotu ze zbiornika wody zasilającej do wlotu do kotła. Współprzepływ dwóch faz stwarza duże problemy ruchowe i konieczność stosowania specjalnych rozwiązań zapewniających bezpieczną i efektywną pracę instalacji. Należy zapewnić najlepsze w miarę możliwości odseparowanie fazy gazowej i parowej w poszczególnych miejscach instalacji, tak abyśmy mieli jak najmniej wody w parze lub jak najmniej pary w wodzie.



Rysunek 10. Schemat prostej instalacji pary i kondensatu.

W skład najprostszej instalacji pary i kondensatu - rysunek 10 - wchodzi:

- źródło pary – najczęściej kocioł parowy lub wytwornica pary,
- rurociąg przesyłowy pary,
- odbiornik ciepła niesionego w parze, który odbierając ciepło od pary powoduje jej kondensację,
- odwadniacz odpowiadający za odprowadzenie kondensatu i niedopuszczenie do przebicia pary na stronę kondensatu,
- instalacja zwrotu kondensatu
- zbiornik wody zasilającej z systemem uzupełniania wody i pompą tłoczącą wodę zasilającą do kotła.

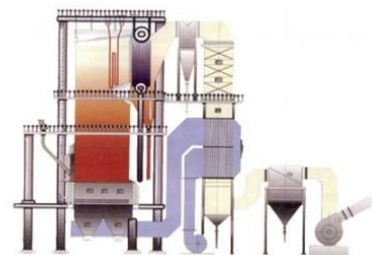
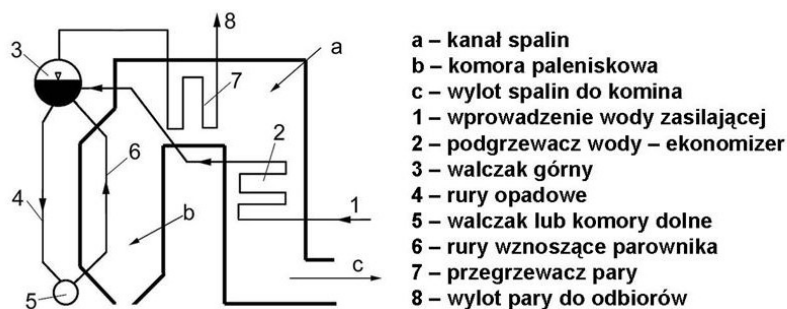
Analizując tę prostą instalację pary i kondensatu między innymi można stwierdzić, iż mimo braku zmian w przepływie masowym pary i wody, występuje bardzo silne zróżnicowanie objętości czynnika przepływającego w różnych miejscach instalacji, to zróżnicowanie wymaga odpowiedniego zwymiarowania przekrojów przepływowych instalacji.

Te i inne problemy związane z instalacjami pary i kondensatu poruszone zostaną w podrozdziałach omawiających poszczególne części instalacji pary i kondensatu.

## 6.1 Wytwarzanie pary wodnej

W zakładach przemysłowych parę wytwarzamy wykorzystując kotły parowe lub wytwornice pary. Urządzenia te możemy zdefiniować jako mniej lub bardziej skomplikowane wymienniki ciepła, w których energia chemiczna doprowadzana w paliwie jest zamieniana w energię cieplną zawartą w parze wodnej.

Energia chemiczna zawarta w paliwie na skutek spalania (egzotermiczna reakcja utleniania) pierwiastków składowych paliwa (węgiel, wodór, siarka) ulega konwersji w energię cieplną gorących spalin. Część kotła (rysunek 11), gdzie zachodzi proces spalania paliwa nazywamy komorą paleniskową. Gorące spaliny przekazują energię cieplną przez ścianki powierzchni ogrzewalnych do podgrzewanej wody doprowadzając ją do wrzenia, a następnie powodując jej odparowywanie. Część wodną kotła, w której następuje odparowanie wody nazywamy parownikiem. Z parownika mieszanina parowo-wodna trafia do walczaka kotła, gdzie następuje separacja fazy parowej i wodnej. Para powstająca przy nadciśnieniu w kotle przepływa z walczaka do instalacji dystrybucji pary.

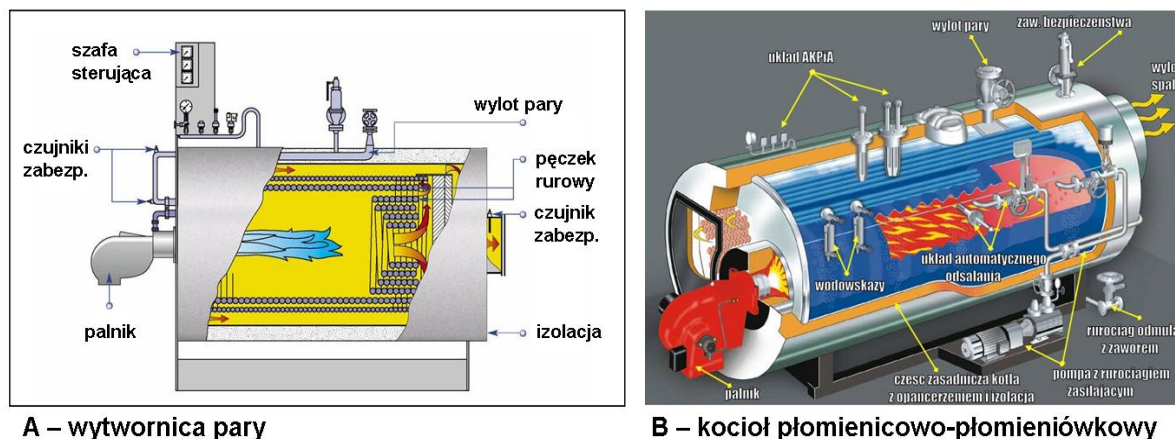


Rysunek 11. Kocioł parowy wodnorurkowy. Podstawowe elementy konstrukcyjne.

Zależnie od konstrukcji kotła parowego mogą występować rozbieżności od opisanej metody wytwarzania pary. Przykładem może być często stosowany w przemyśle kocioł płomienicowo-płomieniówkowy (rysunek 12b). Płaszcz części parowo-wodnej takiego kotła jest równocześnie parownikiem i walczakiem. Inny przykład, to kocioł przepływowy, czyli popularnie wytwornica pary (rysunek 12a), różni się od kotła parowego wodnorurkowego z naturalną cyrkulacją (rysunek 11) przede wszystkim tym, że nie występuje w niej walczak,

a separacja faz odbywa się zazwyczaj poza wytwornicą przy wykorzystaniu zewnętrznego separatora odśrodkowego lub też w rurach wytwornicy dochodzi do całkowitej przemiany wody w parę włącznie z jej przegrzaniem.

W niektórych zastosowaniach para nasycona zanim trafi do instalacji dystrybucji pary wprowadzana jest ponownie do rurowego pęczka grzewczego (przegrzewacz pary) umieszczonego w kanale spalinowym, para ta pobierając ciepło od spalin ulega przegrzaniu, uzyskujemy w ten sposób parę przegrzaną.



Rysunek 12. Wytwornica pary (a) i kotłownia płomieniowo-płomieniówkowa (b)

Dla podniesienia sprawności kotła parowego bardzo często stosuje się podgrzewacze wody. Zabudowywane na kanałach spalin już o stosunkowo niskiej temperaturze rurowe wymienniki spalin-ywoda umożliwiają podgrzew chłodniejszej wody zasilającej zapewniając obniżenie temperatury spalin na wylocie z kotła, czyli zmniejszenie straty wylotowej,

Kotły parowe to bardzo złożone urządzenia, ich wytwarzanie wymaga ze strony producenta olbrzymich doświadczeń i bazy badawczej. W związku z tym pozostaje nam często oprzeć się na założeniu, iż wybrany przez nas dostawca kotła jest na tyle kompetentnym producentem, że gwarantuje nam bezproblemową, bezpieczną i ekonomiczną pracę kotła parowego (jeżeli tak nie jest to niestety omówienie problematyki przekracza możliwości w zakresie objętości tego artykułu). Dzięki temu możemy tu ograniczyć się do stwierdzenia: mamy kotłownię parową zapewniającą nam wyprodukowanie potrzebnej ilości pary o żądanych parametrach i co dalej?

## 6.2 Przesył pary wodnej

Po wyprodukowaniu pary w źródle konieczne jest jej przesłanie do odbiorców, do tego celu wykorzystuje się system odpowiednio zaprojektowanych rurociągów. Budując system rurociągów przesyłu pary konieczne jest uwzględnienie wielu ważnych zasad, dzięki którym zabezpieczamy się przed problemami związanymi z eksploatacją czynnika dwufazowego. Podstawowe zasady dotyczą: właściwego doboru prędkości przepływu pary w rurociągach, uwzględnienia zabudowy systemu odwodnień, zachowania wymaganych spadków rurociągów, poprawnego systemu rozdzielania pary, zabezpieczenia przed powstawaniem uderzeń wodnych.

### 6.2.1. Dobór średnicy rurociągu pary

Średnicę rurociągu parowego możemy wyznaczyć w oparciu o jedną z dwóch najczęściej stosowanych metod:

#### Metoda uproszczona – założenie prędkości przepływu

służy do wymiarowania krótkich odcinków rurociągów parowych (np. w obrębie kotłowni lub bezpośrednio przy odbiorniku), wykorzystując zalecany przedział prędkości przepływu pary

oraz znając jej ciśnienie i masowy przepływ pary można w oparciu o wzór (2) wyznaczyć zalecaną średnicę rurociągu parowego

$$DN = 18,8 \cdot \sqrt{\frac{G \cdot v''}{w}} \quad (2)$$

gdzie:

G - masowy przepływ pary [kg/h]

v'' - objętość właściwa pary przy ciśnieniu roboczym [m<sup>3</sup>/kg] (z tablic parowych)

w - zalecana prędkość przepływu pary w rurociągu [m/s]

ciśnienie pary nasyconej [bar(g)]	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25	>25
zalecana prędkość przepływu pary nasyconej - w [m/s]	15	20	25	30	35	40
dla pary przegranej można stosować wyższe prędkości przepływu do 65m/s						

metoda ta nie gwarantuje nam dotrzymania parametrów ciśnienia pary na końcu wymiarowanego rurociągu, ponieważ nie sprawdzamy spadku ciśnienia na tym rurociągu, z tego powodu należy zwracać uwagę na długość rurociągu i w przypadku rurociągów przekraczających 30-50 m stosować metodę dokładną

## Metoda dokładna – obliczenia oporów przepływu

służy do wymiarowania rurociągów o większej długości, przede wszystkim rurociągów przesyłowych oraz takich, gdzie wymagane jest dotrzymanie wymaganego ciśnienia przed odbiornikami

w metodzie konieczne jest dokładne opisanie całego rurociągu w zakresie jego długości, średnic, kolan, trójników, kompensatorów i całej zastosowanej armatury (zawory odcinające, zwrotne itp.), dla opisanego rurociągu wyznaczany jest sumaryczny współczynnik oporów  $\Sigma C$ , a następnie za pomocą wzoru (3) można wyznaczyć opory przepływu

$$\Delta p = \Sigma C \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (3)$$

gdzie:

$\Delta p$  – obliczeniowy spadek ciśnienia w rurociągu [Pa]

$\Sigma C$  – sumaryczny współczynnik oporów [-]

$\rho$  – gęstość pary wodnej w warunkach roboczych [kg/m<sup>3</sup>]

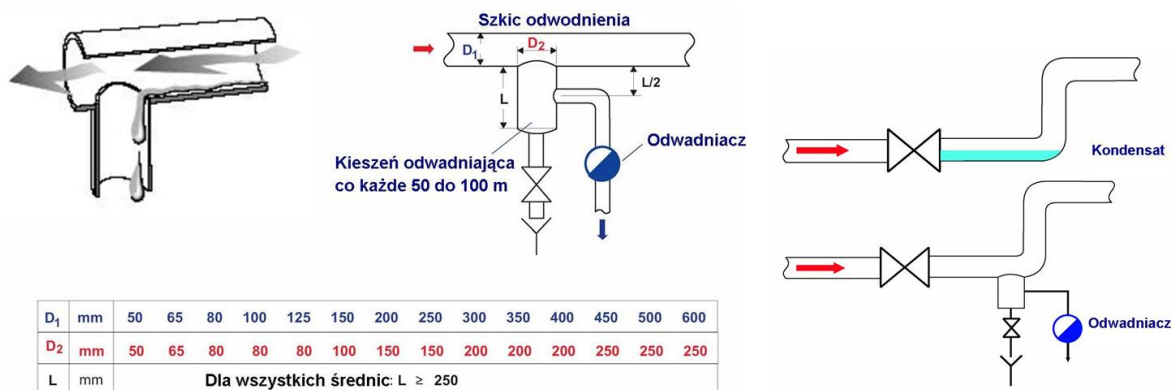
metoda z pozoru prosta jednak ze względu na procedurę wyznaczania współczynnika oporu jest metodą pracochłonną, dla ułatwienia i przyspieszenia obliczeń stosowane są specjalne nomogramy przeliczeniowe oraz komputerowe arkusze kalkulacyjne

### 6.2.2. Odwadnianie rurociągu parowego

Pamiętajmy, że para nasycona już opuszczając kocioł zawiera w sobie pewne ilości wody, a przepływając w rurociągach, nawet tych z najlepszą izolacją cieplną, oddaje ciepło do otoczenia co powoduje dalszą kondensację części pary, zwiększając tym samym udział fazy ciekłej w parze. Pozwalając na współprzepływ obu faz w rurociągu możemy doprowadzić do poważnych problemów ruchowych spowodowanych uderzeniami wodnymi lub erozją elementów składowych rurociągu.

Tematyka uderzeń wodnych w rurociągach parowych w bardzo dużym skrócie została omówiona w następnym rozdziale. Jeżeli zaś chodzi o erozję, to proszę użyć wyobraźni i zastanowić się nad następującym opisem. Kropla wody zawieszona w parze może mieć prędkość zbliżoną do prędkości pary, czyli może poruszać się z prędkością do 40 m/s w rurociągu lub nawet ponad 100 m/s wewnątrz zaworu regulacyjnego, inaczej prędkości te możemy zapisać 144 km/h i 360 km/h – to bardziej przemawia do naszej wyobraźni.

Porównując w skali kroplę wody i samochód poruszające się z takimi prędkościami, wyobraźmy sobie co będzie się działo, jeżeli samochód zderzy się ze ścianą. Oczywiście ulegnie on rozbiciu, ale również bardziej lub mniej uszkodzi ścianę. To samo zjawisko będzie zachodziło wewnątrz rurociągu z przepływającą parą o znacznej zawartości wody. Krople wody uderzając w kolana lub elementy wyposażenia rurociągu będą je systematycznie drążyć. Proszę pamiętać, że tych kropeł „samochodów” w rurociągu mogą być ogromne ilości, co oznacza ciągłe zderzenia i ciągłe wybijanie drobnych fragmentów materiału konstrukcyjnego – zjawisko to nazywamy erozją.



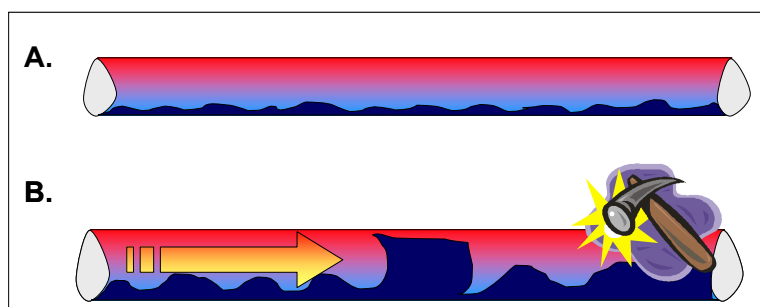
Rysunek 13. Odwodnienia rurociągów pary

Woda (kondensat) w rurociągu parowym płynie w dolnej jego części oraz w postaci kropeł zawieszonych w parze. Płynącą po dnie rurociągu parę wodę musimy odprowadzać za pomocą systemu odwodnień pokazanych na rysunku 13. Odwodnienie takie powinno zostać wykonane co 50 do 100 m poziomego odcinka rurociągu oraz przed każdym podniesieniem (zmianą kierunku przepływu z poziomego w pionowy do góry) rurociągu. Mniejsze odległości między odwodnieniami należy stosować dla rurociągów zewnętrznych, większe można zastosować dla rurociągów położonych w halach lub budynkach.

Odwodnienie musi zapewnić sprawne odprowadzanie kondensatu nie tylko w czasie normalnej pracy instalacji, ale również podczas jej rozruchu, gdy tworzą się bardzo duże ilości kondensatu. Woda pozostająca w czasie rozruchu w instalacji parowej może być przyczyną bardzo groźnych termicznych uderzeń wodnych.

### 6.2.3 Uderzenia wodne w rurociągu parowym

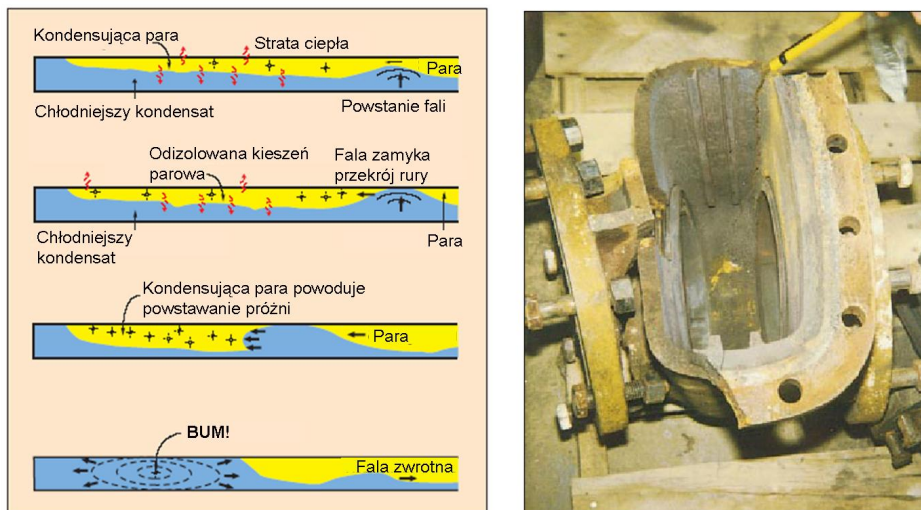
Uderzenia wodne w rurociągach parowych najczęściej są spowodowane ich niewłaściwym odwodnieniem. Kondensat w rurociągu gromadzi się w jego dolnej części. Para przepływająca z dużą prędkością nad zgromadzoną wodą powoduje falowanie jej powierzchni - rysunek 14.A. Jeżeli kondensat nie jest odprowadzany z rurociągu parowego, jego ilość systematycznie wzrasta i w pewnym momencie dochodzi do powstania fali, która zamknie prześwit rurociągu parowego - rysunek 14B.



Rysunek 14. Uderzenia wodne w rurociągach parowych.

W tym momencie tworzy się „korek” wodny. Korek ten początkowo porusza się dużo wolniej niż para, ale z jednej strony jest napędzany parą, a z drugiej jego strony para „uciekła” tworząc przed korkiem próżnię. Próżna ta staje się znaczącą siłą napędową „koraka”. Zaczyna on się poruszać z bardzo dużymi prędkościami, aż do napotkania oporu miejscowego np. zawór odcinający, kolano rurociągu itp., gdzie następuje uderzenie i rozładowanie energii kinetycznej, często prowadzące do poważnej awarii.

W nieprawidłowo odwadnianych rurociągach parowych dochodzi również do typowych termicznych uderzeń wodnych, szczególnie podczas ich rozruchu. Na powstanie termicznego uderzenia wodnego mają wpływ procesy cieplne związane z przemianami fazowymi. Ten rodzaj uderzenia wodnego powstaje w przypadku przepływu pęcherzy parowych przez chłodniejszy kondensat lub też, gdy mieszanina parowo-wodna powstająca z rozprężanego kondensatu, łączy się z kondensatem o niższej temperaturze. Na skutek gwałtownego odbioru ciepła przez kondensat pęcherze parowe gwałtownie maleją (para ulega kondensacji), co powoduje powstanie próżni i natychmiastowy napływ kondensatu w kierunku próżni, aż do zderzenia się czoł kondensatu (implozja). Na rysunku 15 zaprezentowano sposób w jaki powstaje termiczne uderzenie wodne.



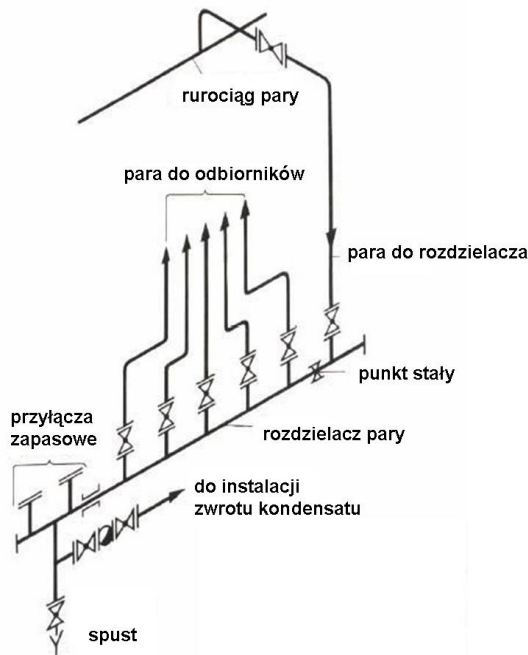
Rysunek 15. Mechanizm powstawanie termicznych uderzeń wodnych i ich skutki

Intensywność termicznego uderzenia wodnego zależy od wielkości powierzchni kontaktu między parą i wodą, prędkości przepływu wody i pary oraz różnicy temperatur pomiędzy parą i wodą. Na rysunku 15 pokazano również skutki niszczycielskiej działalności termicznego uderzenia wodnego.

#### 6.2.4. Rozdzielacze pary

Rozdzielacz pary to urządzenie instalacji parowej, które odpowiada za takie rozdzielanie głównego strumienia pary na strumienie zasilające poszczególne odbiorniki lub zespoły odbiorników, które zapewni prostą i bezpieczną obsługę oraz uzyskanie możliwie najwyższej jakości pary. Omówmy zasadę działania poziomego rozdzielacza na podstawie rysunku 16.

Podstawową zasadą przy rozdzielaniu strumienia pary (nie tylko w przypadku rozdzielaczy) jest pobieranie pary z górnej części rurociągu poziomego, jak również wprowadzanie pary do następnego rurociągu lub rozdzielacza poziomego powinno również odbywać się od góry. Dzięki temu pobieramy z rurociągu głównego tylko parę, bez zanieczyszczeń gromadzących się na jego dnie.



Rysunek 16. Poziomy rozdzielacz pary

Realizując wprowadzenie pary (od góry!) do rozdzielacza skrajnie po prawej jego stronie, wszystkie przyłącza odprowadzające parę do odbiorników powinny być usytuowane po lewej stronie od przyłącza wprowadzenia pary, a na skrajnym lewym końcu należy zabudować odwodnienie. Dzięki takiej konstrukcji przepływ pary będzie pchał kondensat w stronę odwodnienia. Zalecany jest spadek zabudowy rozdzielacza pary ok. 1% w kierunku odwodnienia. Należy unikać przeciwnych przepływów pary i kondensatu w rozdzielaczu, mogą one być przyczyną złego odwodnienia i porywania wody do instalacji pary. Pole przekroju rozdzielacza powinno być większe od sumy pól przekroju wszystkich jego przyłączy. Warto pamiętać o wykonaniu przynajmniej dwóch przyłączy zapasowych, w przyszłości ułatwi to podłączenie nowych odbiorów bez problematycznego wpalania się w rozdzielacz z nowymi przyłączami.

### 6.2.5. Zalecane spadki rurociągów parowych

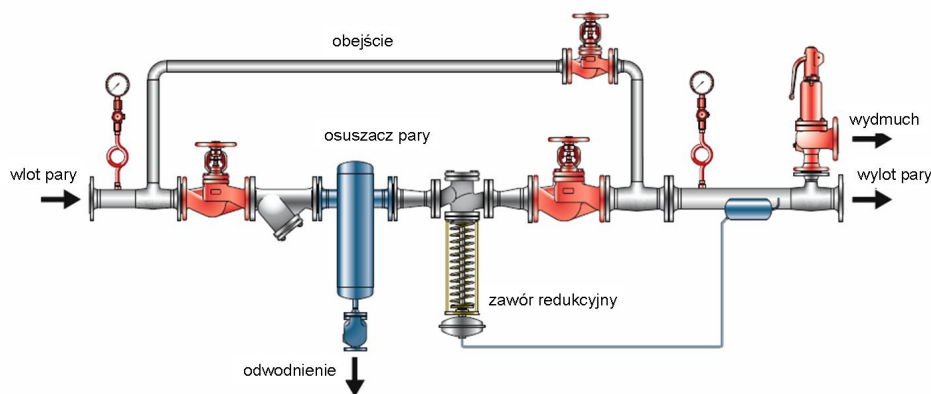
Rurociągi pary powinny być prowadzone z zalecanym spadkiem w kierunku odwodnień. W znakomitej większości przypadków kierunek przepływu pary i kondensatu w stronę odwodnienia powinien być taki sam – współprądowy przepływ pary i kondensatu w rurociągu. W takim przypadku zalecany spadek rurociągu pary w kierunku jej przepływu powinien wynieść 0,5‰ (0,5mm spadku na 1m rurociągu) do 3 ‰ (3mm spadku na 1m rurociągu). Jedynie w wyjątkowych sytuacjach i na krótkich odcinkach, np. w celu ominięcia przeszkód budowlanych, można stosować przeciwny przepływ pary i kondensatu w rurociągu. W takim przypadku konieczne jest znaczące zwiększenie średnicy rurociągu pary, tak aby przepływała ona z mniejszą prędkością, oraz wykonanie spadku rurociągu w kierunku przeciwnym do przepływu pary w wartości z zakresu 10‰ (10mm spadku na 1m rurociągu) do 25‰ (25mm spadku na 1m rurociągu).

### 6.3. Kondycjonowanie pary wodnej

Specyficzne uwarunkowania różnych procesów technologicznych wymagają zastosowania pary o różnych parametrach. Dostosowywanie parametrów pary, przede wszystkim ciśnienia i temperatury, do potrzeb naszych warunków technologicznych nazywamy kondycjonowaniem pary. Tak więc do procesów kondycjonowania pary zaliczymy procesy redukcji ciśnienia oraz schładzania pary do temperatury zgodnej z wymogiem technologii.

## 6.3.1. Redukcja ciśnienia

Ciśnienie pary redukowane jest zazwyczaj za pomocą zaworów redukcyjnych. Są nimi zawory bezpośredniego działania (nie wymagają dodatkowego źródła energii) lub też zawory regulacyjne z siłownikami elektrycznymi lub pneumatycznymi (zazwyczaj większa dokładność regulacji). Częściej jednak mówimy o stacji redukcyjnej, gdyż oprócz zaworu redukcyjnego wymagany jest osprzęt pomocniczy, odcinający, odwadniający i zabezpieczający. Typowa stacja redukcyjna z zaworem redukcyjnym bezpośredniego działania pokazana jest na rysunku 17.



Rysunek 17. Stacja redukcji ciśnienia pary z zaworem redukcyjnym bezpośredniego działania

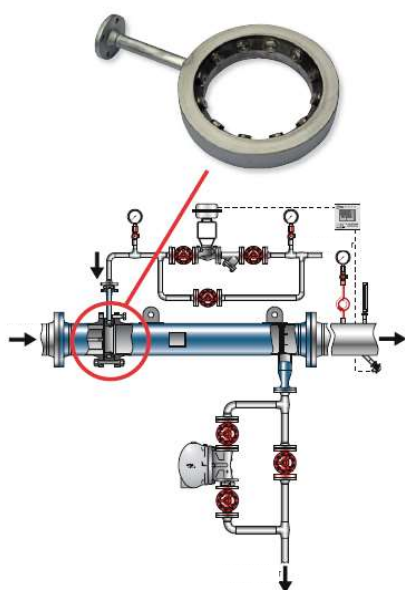
Procesowi redukcji ciśnienia szczególnie przy dużych spadkach ciśnienia i dużych przepływach często towarzyszy wysoki poziom hałasu akustycznego. W takich momentach konieczne jest zastosowanie specjalnych systemów tłumienia hałasu stanowiących wyposażenie wewnętrzne zaworu lub też instalowanych za zaworem.

Sumarycznie proces redukcji ciśnienia jest procesem izentalpowym, czyli ilość ciepła w parze przed i po redukcji są takie same (w rozważaniach pomijamy przemiany zachodzące w samym zaworze). W przypadku niewielkich redukcji ciśnienia (kilka do kilkunastu bar) pary nasyconej ze względu na pewne zwartości wody w parze przed redukcją możemy przyjąć, że po redukcji para o niższym ciśnieniu jest również parą nasyconą lub osiągnie stan nasycenia w odcinku rurociągu po redukcji (nadwyżka ciepła zostanie wykorzystana do częściowego odparowania wody płynącej z parą w czasie redukcji ciśnienia). Przy większych stopniach redukcji ciśnienia lub gdy stosowane są systemy osuszające parę przed redukcją, możliwe jest uzyskanie po redukcji niskociśnieniowej pary lekko przegrzanej.

## 6.3.2. Schładzanie pary przegrzanej

Schładzanie pary trzeba realizować w momencie konieczności dostosowania parametru temperatury pary przegrzanej do wymagań procesu technologicznego. Buduje się różne systemy schładzaczy pary przegrzanej – rysunek 18. Najczęściej stosuje się systemy wtrysku wody chłodzącej do rurociągu parowego. Schładzacz wtryskowy nie uzyskuje parametru nasycenia pary na wylocie, temperatura pary wylotowej jest nieco wyższa od temperatury nasycenia. Realizuje się to ze względu na układ pomiarowy czujnika temperatury, który w parametrze nasycenia nie jest w stanie rozpoznać czy rurociągiem płynie para nasycona czy woda wrząca. Ciekawym rozwiązaniem jest natomiast stacja schładzająca kąpielą wodną. W procesie schładzania nie jest wykorzystywany pomiar temperatury pary. Para doprowadzona do zbiornika zostaje rozdrobniona na niewielkie pęcherzyki, które przepływają przez pojemność wodną oddając do wody ciepło przegrzania. Część wody odparowuje, wobec tego poziom wody musi być utrzymywany przez jej uzupełnianie. Jest to jedyna konstrukcja schładzacza zapewniająca na wylocie parametr nasycenia pary przy ciśnieniu roboczym.

Schładzanie pary przez wtrysk wody chłodzącej



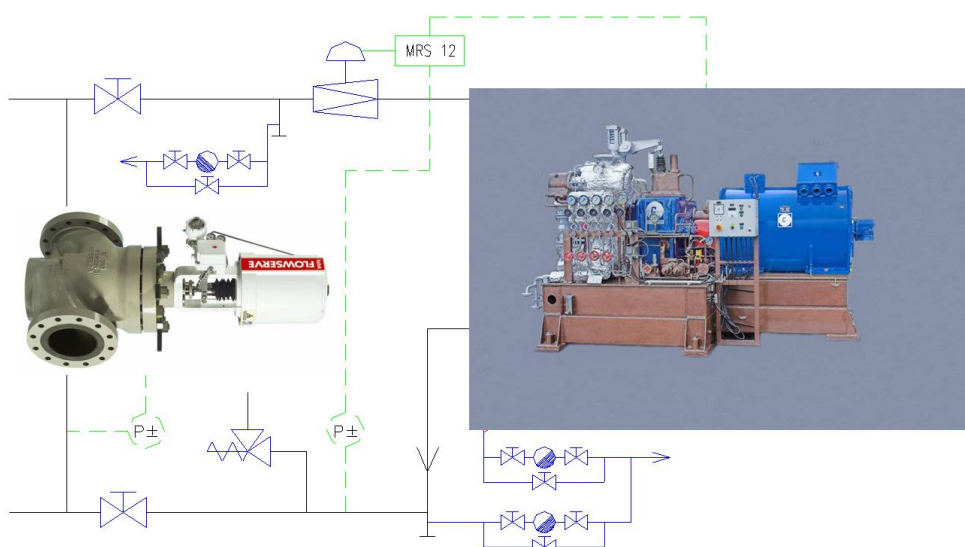
Schładzanie pary kąpielą wodną



Rysunek 18. Różne systemy schładzaczy pary

### 6.3.3. Przeciwnieprężna turbina redukcyjna

Wiele zakładów przemysłowych produkuje parę w kotłach parowych pracujących przy ciśnieniach o wiele wyższych niż wynikające z rzeczywistego zapotrzebowania procesu produkcyjnego. Ma to miejsce szczególnie w przypadku wykorzystywania starszych typów rusztowych kotłów wodnorurkowych, ale nie tylko. W większości zastosowań w celu obniżenia ciśnienia pary do odpowiedniego dla procesu, stosuje się zawory redukcyjne. Przeciwnieprężna parowa turbina redukcyjna nazywana również mikro-turbiną wykonuje tę samą funkcję redukcyjną co zawór redukcyjny, przy dodatkowej konwersji energii redukowanej pary w energię elektryczną. Mikro-turbina nie powoduje zwiększenia zużycia pary przez zakład. Natomiast zapewniając redukcję ciśnienia pary w ilości wymaganej dla potrzeb technologicznych, zakładu dodatkowo wytwarza pewne ilości energii elektrycznej, która może być wykorzystana na potrzeby własne.



Rysunek 19. Mikro-turbina, czyli przeciwnieprężna parowa turbina redukcyjna w systemie parowym

Mikro-turbina stanowi zazwyczaj element dodatkowy w stosunku do istniejącego lub projektowanego systemu redukcyjnego – rysunek 19. W podstawowej wersji nie zapewnia stabilizacji ciśnienia pary na wylocie, to zadanie ma spełniać zainstalowany równolegle zawór redukcyjny. Stabilizacja temperatury pary podawanej do procesu wymaga zastosowania schładzacza pary po redukcji. Najczęściej możliwy jest montaż mikro-turbiny bez istotnej modernizacji istniejącej w zakładzie stacji redukcyjno-schładzającej.

## 6.4. Odwadnianie odbiorników ciepła

Kiedy już doprowadziliśmy parę o żądanych parametrach i jakości do naszego odbiornika w procesie technologicznym wydaje nam się, że to już koniec naszych problemów z instalacją pary i kondensatu. Niestety nie. Następnym krokiem jest konieczność usuwania kondensatu z naszych odbiorników w taki sposób aby nie powodować utraty pary grzewczej. Kondensat pozostający w przestrzeni grzewczej odbiornika ciepła będzie przyczyną pogorszenia się procesu wymiany ciepła. Para przebijająca się poza powierzchnie grzewcze odbiornika będzie przyczyną wzrostu kosztów nośnika energii w cenie produktu. Tu pojawia się pytanie: „W jaki sposób można odprowadzić z odbiornika ciepła każdą kroplę tworzącego się kondensatu, a jednocześnie zapobiec wypływowi (stracie) pary z tego odbiornika?”. Urządzeniem, którego zadaniem jest realizowanie tych funkcji jest odwadniacz.

„Odwadniacz uniwersalny – NIE ISTNIEJE”. Nie ma odwadniacza - złotego środka, który bez analizy instalacji pary i kondensatu, jak czarodziejska różdżka, może rozwiązać wszelkie problemy w niej występujące. Nie dajmy się zwodzić producentom jednego typu odwadniacza, że to ich produkt jest panaceum na wszelkie problemy w instalacji pary i kondensatu. Z drugiej strony procedura doboru odwadniacza musi objąć cały szereg aspektów związanych z miejscem jego zainstalowania, stawianym mu zadaniom i parametrami roboczymi. Źle dobrany odwadniacz będzie faktycznie przyczyną problemów w pracy instalacji pary i kondensatu.

Zainteresowanych tematyką odwadniaczy zachęcam do zapoznania się z moim artykułem: „Odwadniacz w systemie parowym” dostępnym na stronie internetowej: [www.szalucki.pl](http://www.szalucki.pl)

## 6.5. Wymiarowanie rurociągów kondensatu

Rurociąg przed odwadniaczem wymiarujemy przy założeniu przepływu czynnika ciekłego (kondensatu) w warunkach wrzenia. Zalecana prędkość przepływu kondensatu, w przypadku rurociągu kondensatu przed odwadniaczem, powinna zawierać się w przedziale 0,3 do 0,7 m/s. Zalecaną średnicę rurociągu pary przed odwadniaczem możemy obliczyć w oparciu o wzór (3).

$$DN = 18,8 \cdot \sqrt{\frac{G \cdot v''}{w}} \quad (3)$$

gdzie:

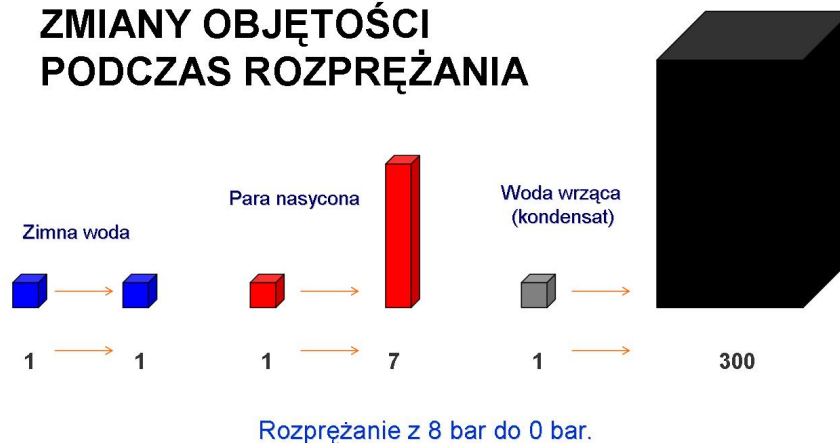
G - masowy przepływ kondensatu [kg/h]

v'' - objętość właściwa wody wrzącej przy ciśnieniu roboczym [m<sup>3</sup>/kg] (z tablic parowych)

w - zalecana prędkość przepływu kondensatu 0,3-0,7 [m/s]

Dobór rurociągu kondensatu za odwadniaczem musi być rozpatrywany pod kątem powstawania pary wtórnej z rozprężania wysokociśnieniowego kondensatu wrzącego na dyszy odwadniacza. Jeżeli temperatura kondensatu, nawet przy jego pierwotnie niskim ciśnieniu, jest bliska temperaturze wrzenia, to objętość powstającej za dyszą odwadniacza pary z rozprężania wielokrotnie przewyższa objętość kondensatu w stanie ciekłym – rysunek 20.

## ZMIANY OBJĘTOŚCI PODCZAS ROZPRĘŻANIA



Rysunek 20. Przyrost objętości kondensatu wrzącego po rozprężeniu.

W tym przypadku należy wymiarować rurociągi kondensatu w oparciu o wyliczenia ilości powstającej pary z rozprężania. Następnie trzeba wyznaczyć objętościowe natężenie przepływu mieszaniny parowo-wodnej, co przy wykorzystaniu zalecanej prędkości przepływu umożliwi nam wyznaczenie wymaganej średnicy rurociągu kondensatu za odwadniaczem. Zalecana prędkość przepływu mieszaniny pary wtórnej i kondensatu w przypadku rurociągu kondensatu za odwadniaczem, powinna zawierać się w przedziale 15 do 25 m/s. Stosunkowo skomplikowane i wymagające wykorzystania tablic parowych obliczenia, można uprościć stosując prostą (czyli bliższą sercu inżyniera praktyka) formułę mnożenia dwóch współczynników odczytanych z tabeli - rysunek 21.

Ciśnienie, bar abs.	Temperatura wrzenia °C	Ciśnienie na końcu przewodu kondensatu (bar abs.)																							
		0,2	0,5	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	6	7	8	9	10	12	15	18	20		
1,0	99	35,7	16,0	7,4																					
1,2	104	37,9	18,0	10,0	6,1																				
1,5	111	40,1	20,6	12,9	9,5	6,8																			
2,0	120	44,2	23,5	15,8	12,6	10,3	7,6																		
2,5	127	46,8	25,5	17,7	14,5	12,3	9,2	5,3																	
3,0	133	48,8	27,1	19,2	16,0	13,9	10,7	7,3	4,5																
3,5	138	50,4	28,4	20,4	17,1	15,0	11,9	8,5	6,0	3,8															
4,0	143	52,0	29,6	21,5	18,2	16,0	12,9	9,7	7,3	5,3	3,5														
4,5	147	53,3	30,5	22,3	19,0	16,9	13,7	10,5	8,1	6,3	4,7	3,0													
5	151	54,3	31,5	23,1	19,8	17,7	14,4	11,2	8,9	7,1	5,6	4,2	2,8												
6	155	55,7	32,3	23,9	20,5	18,4	15,2	11,9	9,6	7,9	6,5	5,1	4,0	2,7											
7	158	56,5	33,0	24,5	21,1	18,9	15,7	12,4	10,1	8,4	7,0	5,7	4,6	3,5	2,1										
8	170	59,9	35,5	26,7	23,1	20,9	17,6	14,2	11,9	10,2	8,9	7,7	6,7	5,8	4,8	4,0									
9	175	61,3	36,4	27,5	23,9	21,7	18,3	14,9	12,6	10,9	9,5	8,4	7,4	6,6	5,5	4,8	2,4								
10	179	62,3	37,2	28,2	24,6	22,7	18,9	15,5	13,1	11,4	10,0	8,9	7,9	7,1	6,0	5,3	3,3	2,1							
12	187	64,4	38,7	29,5	25,7	23,5	19,9	16,5	14,1	12,3	11,0	9,8	8,9	8,0	7,0	6,2	4,5	3,6	2,8						
15	197	66,9	40,5	31,8	27,2	24,8	21,5	17,7	15,2	13,4	12,0	10,8	9,9	9,1	8,0	7,2	5,6	4,8	4,2	2,9					
18	206	69,0	42,0	32,3	28,4	26,0	22,3	18,7	16,2	14,3	12,9	11,7	10,8	9,9	8,8	8,0	6,5	5,7	5,1	3,9	2,5				
20	211	70,2	42,9	33,0	29,0	26,6	22,9	19,2	16,7	14,8	13,4	12,2	11,2	10,4	9,2	8,4	7,0	6,2	5,6	4,4	3,1	1,7			
25	223	72,9	44,8	34,7	30,6	28,1	24,2	20,4	17,9	15,9	14,5	13,2	12,2	11,4	10,2	9,3	7,9	7,1	6,5	5,4	4,2	3,1	2,5		
30	233	75,1	46,3	36,0	31,8	29,2	25,3	21,4	18,8	16,8	15,3	14,0	13,0	12,1	10,9	10,0	8,6	7,8	7,2	6,1	4,9	4,0	3,4		
35	241	76,8	47,5	37,0	32,7	30,1	26,1	22,1	19,5	17,5	15,9	14,6	13,6	12,7	11,4	10,5	9,2	8,4	7,8	6,7	5,5	4,5	4,0		
40	249	78,5	48,7	38,0	33,6	31,0	26,9	22,9	20,1	18,1	16,5	15,2	14,1	13,2	12,0	11,0	9,7	8,6	8,2	7,1	6,0	5,0	4,5		
45	256	80,0	49,7	38,8	34,4	31,7	27,5	23,5	20,7	18,6	17,0	15,7	14,6	13,7	12,4	11,4	10,1	9,3	8,6	7,5	6,3	5,4	4,9		
50	263	81,4	50,7	39,6	35,2	32,5	28,2	24,1	21,2	19,1	17,5	16,2	15,1	14,2	12,8	11,8	10,5	9,6	9,0	7,9	6,7	5,7	5,2		

Dla określenia rzeczywistej średnicy (mm) należy podane wyżej wartości pomnożyć przez następujące współczynniki:

kg/h	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1500	2000	3000	5000	8000	10000	15000	2000
współczynnik	1,0	1,4	1,7	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,9	4,5	5,5	7,1	8,9	10,0	12,2	14,1

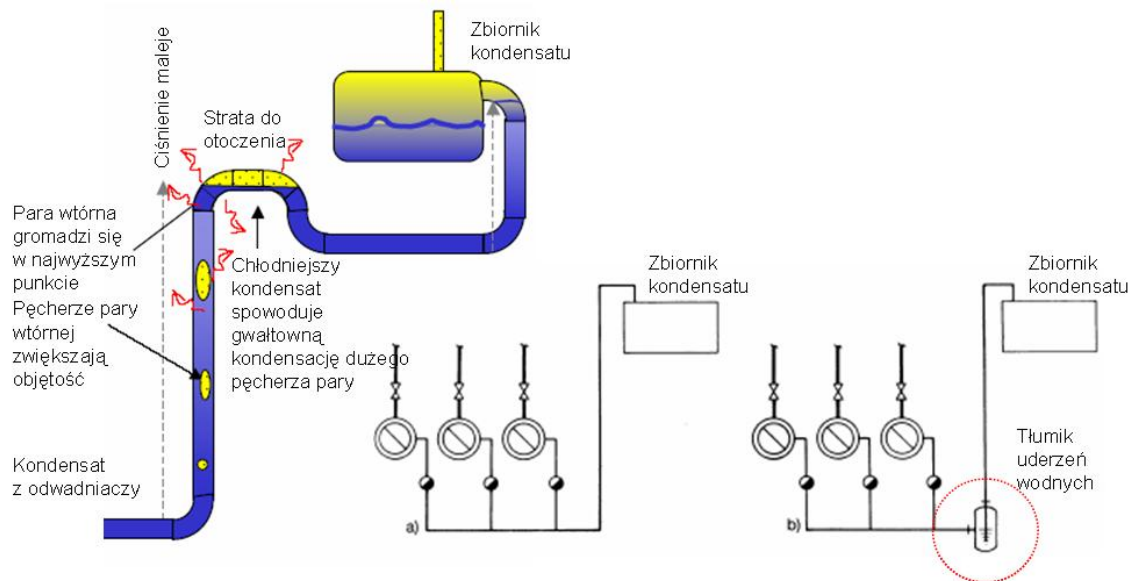
Rysunek 21. Określenie średnicy nominalnej rurociągu kondensatu za odwadniaczem

## 6.6. Niebezpieczeństwo uderzeń wodnych w instalacji kondensatu

Termicznego uderzenia wodnego w instalacji kondensatu nie można dokładnie przewidzieć, ale wiele aspektów związanych z możliwością jego powstawania trzeba przeanalizować już na etapie projektowania i budowy instalacji kondensatu. Najlepszym rozwiązaniem jest takie zaprojektowanie i wykonanie instalacji, żeby nie było możliwości powstania uderzenia wodnego. Jeżeli jest to jednak niemożliwe, trzeba przewidzieć zastosowanie odpowiednich urządzeń tłumiących.

Podstawowe przyczyny pojawiania się uderzenia wodnego w instalacji kondensatu związane są z mieszaniem się kondensatów z różnych źródeł tj. gorącego kondensatu zawierającego parę z rozprężania z kondensatem chłodniejszym. Bardzo często termiczne uderzenia wodne występują podczas podnoszenia kondensatu.

W pionowym odcinku rurociągu pęcherze pary wtórnej, występującej w kondensacie, rozpoczynają ruch grawitacyjny ku górze dużo szybszy niż tego oczekujemy i wynika to z przepływu kondensatu – rysunek 22. Ciśnienie wewnątrz rurociągu kondensatu maleje ku górze (coraz mniejszy słup wody), w związku z tym objętość pęcherzy pary rośnie. Z drugiej strony przepływające pęcherze napotyka na swojej drodze zimniejsze obszary kondensatu lub para z rozprężania gromadzi się w najwyższym punkcie rurociągu styka się z dużo chłodniejszym kondensatem, w obu przypadkach dochodzi do implozji i termicznego uderzenia wodnego. Takie uderzenie wodne rozprzestrzenia się z wielką szybkością powodując zniszczenia w instalacji.



Rysunek 22. Termiczne uderzenia wodne przy podnoszeniu kondensatu

Kiedy dochodzi do powstawania niebezpiecznych termicznych uderzeń wodnych przy podnoszeniu kondensatu, zalecane jest zastosowanie rozwiązań, które nie wyeliminują powstawania uderzeń wodnych, ale w sposób zadowalający ograniczą wielkość piku szoku ciśnieniowego. Takimi urządzeniami są tłumiki uderzeń wodnych zastosowane w punkcie rozpoczęcia podnoszenia kondensatu. Poduszka powietrzno-parowa powstająca wewnątrz tłumika ma za zadanie wytłumienie i obcięcie pików ciśnieniowych.

Inną przyczyną powstawania termicznych uderzeń wodnych będzie mieszanie kondensatów:

- o różnych parametrach roboczych (temperatura, ciśnienie, stan),
- powstających z par o znacznie różniącym się ciśnieniu,
- spływających z odbiorników znajdujących się w znacznej odległości względem siebie.

Jeżeli mieszaninę pary wtórnej z rozprężania kondensatu wysokociśnieniowego i kondensatu w stanie nasycenia zmieszamy ze stosunkowo chłodniejszym kondensatem z innego źródła, to praktycznie zawsze będzie dochodziło do uderzeń wodnych w instalacji (gwałtowna kondensacja dużych pęcherzy pary wtórnej). Dla uniknięcia powstawania tego zjawiska najkorzystniejsze jest prowadzenie oddzielnych rurociągów zbiorczych dla kondensatów z różnych, często bardzo odległych odbiorników.

Do jednego rurociągu zbiorczego kondensatu doprowadzamy kondensat powstający z pary o zbliżonym ciśnieniu i z podobnie obciążanych odbiorników. Kondensat do rurociągu zbiorczego wprowadzamy zawsze od góry.

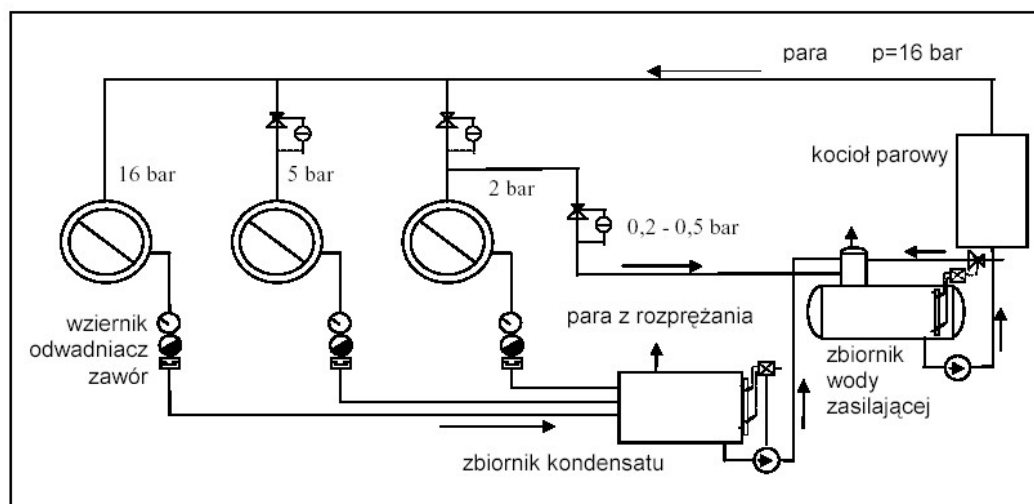
Przebiecie pary do instalacji kondensatu może również spowodować spore niebezpieczeństwo powstania silnego uderzenia wodnego na skutek gwałtownej kondensacji pary w objętości chłodniejszego kondensatu. Niebezpieczeństwo to jest jednym (nie jedynym) z powodów, dla których należy szczególnie dbać o jakość i poprawność (paroszczelność) pracy odwadniaczy.

## 6.7. Zbiornik wody zasilającej / kondensatu

Kondensat spływający systemami rurociągów zwrotu kondensatu trafia zazwyczaj do pośrednich zbiorników kondensatu, a następnie najczęściej jest przetłaczany do zbiornika wody zasilającej usytuowanego w kotłowni. Małe systemy pary i kondensatu mogą pracować bez zbiorników kondensatu wówczas zwrot kondensatu następuje bezpośrednio do zbiornika wody zasilającej.

### 6.7.1. Otwarty układ powrotu kondensatu

Systemy zwrotu kondensatu mogą być budowane jako otwarte lub zamknięte. W systemie otwartym para z rozprężania kondensatu jest najczęściej bezpowrotnie tracona. W systemie zamkniętym jest ona wykorzystywana lub też na skutek utrzymywania wyższego ciśnienia kondensatu nie doprowadzamy do jego odparowania.



Rysunek 23. Otwarty system kondensatu.

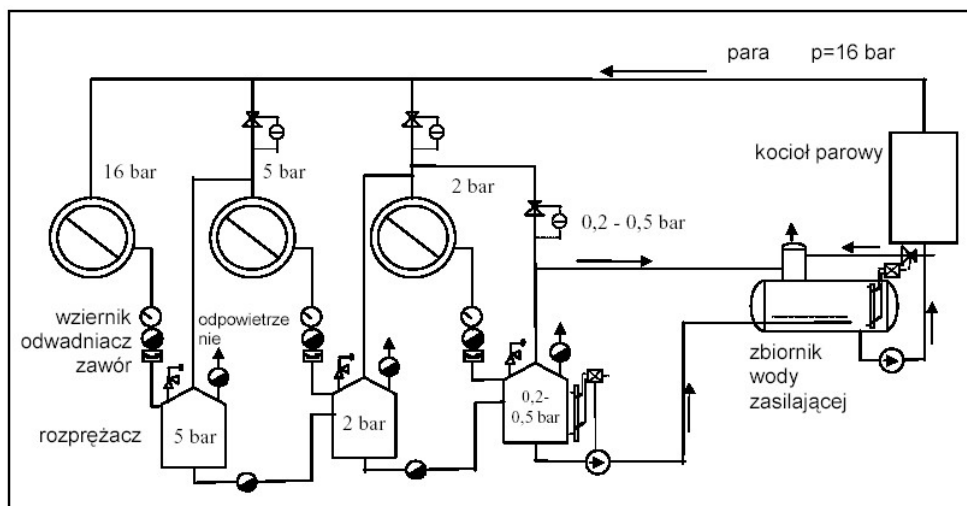
Otwarty układ powrotu kondensatu jest bardzo często spotykany w niewielkich zakładach przemysłowych – rysunek 23. Jest to układ prostszy w eksploatacji i tańszy inwestycyjnie, ale niestety drogi eksploatacyjnie ze względu na stratę pary z rozprężania.

## 6.7.2. Zamknięty układ powrotu kondensatu

Na rysunku 23 przedstawiono schemat układu wymienników ciepła wykorzystującego parę o różnych ciśnieniach (oczywiście odbiorników ciepła pracujących przy jednym z ciśnień może być kilka czy kilkanaście). W tym systemie (nazywanym również otwartym systemem kondensatu) para z rozprężania jest tracona. System ten może zostać zmodyfikowany tak, aby para z rozprężania nie była tracona. W tym celu należy przekształcić system otwarty w system zamknięty, gdzie pomiędzy sekcjami wymienników zainstalowane będą rozprężacze kondensatu (rozprężacz kondensatu to zbiornik ciśnieniowy, w którym następuje separacja pary z rozprężania i kondensatu). Na rysunku 24 przedstawiono zamknięty system kondensatu, w którym zastosowano trój etapowy układ rozprężania. Oczywiście nie zawsze konieczne jest zastosowanie aż tylu stopni rozprężania. Często wystarcza dwu lub jedno stopniowy system rozprężania kondensatu.

W przypadku modyfikacji otwartego systemu kondensatu w system zamknięty, należy koniecznie sprawdzić zastosowane odwadniacze pod względem ich wydajności, w stosunku do wymaganej przy zmniejszonym ciśnieniu różnicowym.

Stosowane są również zamknięte systemy kondensatu z ciśnieniowymi zbiornikami kondensatu pracującymi przy ciśnieniach 2-6 bar, z których kondensat jest bez pośrednictwa zbiornika wody zasilającej przetłaczany pompami do kotła parowego. Systemy takie stosowane są najczęściej przy zwrocie kondensatu na poziomie przekraczającym 70% i w przypadkach wykorzystania pary wysokoparametrowej, powinny one być budowane od podstaw, modernizacja systemu otwartego w system zamknięty z wysokim ciśnieniem kondensatu jest często utrudniona i może prowadzić do powstawania uderzeń wodnych i innych nieprawidłowości ruchowych.



Rysunek 24. Zamknięty system kondensatu ( trzy etapy rozprężania ).

Niewątpliwie zaletą zamkniętych systemów kondensatu w stosunku do systemów otwartych są znaczące oszczędności wynikające z zagospodarowania pary wtórnej z rozprężania gorącego kondensatu – brak strat pary wtórnej. Wady to wyższe koszty inwestycyjne, konieczność rejestracji większej ilości urządzeń, większe prawdopodobieństwo występowania uderzeń wodnych przy błędnym skonstruowaniu instalacji kondensatu.

### 6.7.3. Przygotowanie wody zasilającej dla kotłów parowych

Niezwykle ważnym zadaniem zbiornika wody zasilającej jest gromadzenie odpowiedniego zapasu wody oraz przygotowanie jej zgodnie z wymaganiami bezpiecznej eksploatacji kotłów. Do zbiornika wody zasilającej trafia kondensat powracający z instalacji. Ubytki kondensatu uzupełniane są za pomocą odpowiednio uzdatnionej wody uzupełniającej tak aby w zbiorniku zachowany był żądany poziom nagromadzonej wody. Zbiorniki wody zasilającej dla kotłów parowych budowane są zazwyczaj z zabudowanym systemem odgazowania termicznego zapewniającym usunięcie gazów (tlen i dwutlenek węgla), które mogą silnie korozyjnie oddziaływać na materiał konstrukcyjny kotłów. Do podstawowych zadań systemu termicznego odgazowania wody zasilającej kotły parowe możemy zaliczyć:

- usuwanie tlenu,
- usuwanie dwutlenku węgla,
- podniesienie bezpieczeństwa pracy kotła,
- oszczędności energii.

W przemyśle najczęściej stosowane są odgazowywacze nadciśnieniowe pracujące z wewnętrznym nadciśnieniem z zakresu 0,2 do 0,3 barg (niskociśnieniowe) utrzymywanym za pomocą wtrysku pary grzewczej.

Do zbiornika wody zasilającej dozowane są również preparaty korekty fizykochemicznej wody, które mają za zadanie zapewnienie parametrów wody zasilającej i kotłowej zgodnie z wymaganiami producenta kotła. Woda zasilająca kotły ze zbiornika wody zasilającej pobierana jest przez pompy i przetłaczana do kotła parowego.

### 7. Kontrola instalacji pary i kondensatu

Podstawowe działania w zakresie kontroli pracujących instalacji pary i kondensatu powinny obejmować przede wszystkim:

- zapewnienie szczelności wszystkich złączy, dławic zaworów oraz natychmiastowe usuwanie przecieków pary lub kondensatu,
- dbałość o jakość i stan izolacji cieplnej,
- okresową kontrolę poprawności pracy odwadniaczy – pamiętajmy, że jeden niesprawny odwadniacz może być przyczyną strat ekonomicznych znacząco przewyższających jego wartość,
- reagowanie na objawy świadczące o nieprawidłowej pracy instalacji pary i kondensatu.

### 8. Z parą w parze bez obaw

Podczas wielu moich wizyt na obiektach przemysłowych wykorzystujących parę, zauważyłem wielką obawę ze strony użytkownika w zakresie obsługi i eksploatacji instalacji pary i kondensatu. Tak zrodziła się idea pewnego podsumowania informacji o parze i kondensacie w sposób umożliwiający zrozumienie podstawowych zjawisk zachodzących w systemach pary i kondensatu. Już na początku pisania tego artykułu zdałem sobie sprawę, że nie mam szans na opisanie wszystkich ważnych procesów związanych z instalacjami pary i kondensatu w tak ograniczonym opracowaniu. Niemniej jednak mam nadzieję, że chociaż trochę udało mi się przybliżyć tematykę i zrealizować przesłanie zawarte w tytule: „Z parą w parze”.

Wiele bardziej szczegółowych opracowań w temacie systemy pary i kondensatu znajdzie czytelnik na mojej stronie internetowej: [www.szalucki.pl](http://www.szalucki.pl), serdecznie zapraszam.

---

*Krzysztof Szalucki*

tel. 667994413

e-mail: [krzysztof@szalucki.pl](mailto:krzysztof@szalucki.pl)

[www.szalucki.pl](http://www.szalucki.pl)