



# Określanie masowego natężenia przepływu w rurociągach układu odszraniania gorącymi parami

---

Korzystając z oprogramowania Coolselector<sup>®2</sup>

**Morten Juel Skovrup**

**2017-02-20**

**Wersja 1.32**

Wyznaczanie obliczeniowego strumienia masy na potrzeby doboru w programie Coolselector<sup>®2</sup> odpowiednich rurociągów, armatury i elementów automatyki w układzie odtajania parowników gorącymi parami czynnika chłodniczego.

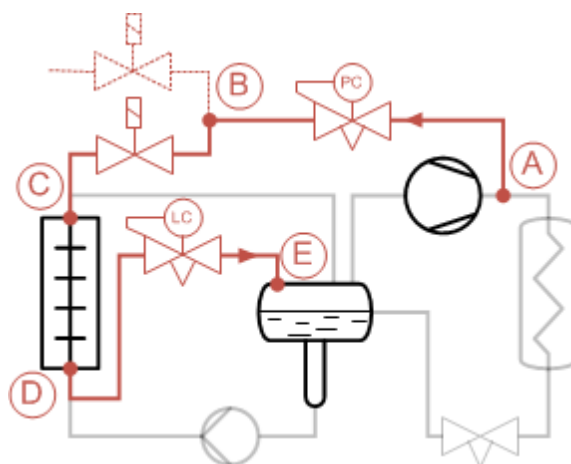


## 1. Wprowadzenie

W programie Coolselector<sup>®</sup>2 opcję odszraniania gorącymi parami uwzględniono w przypadku układów z zasilaniem pompowym i grawitacyjnym, dla których typowa jest obecność więcej niż jednego parownika.

Program Coolselector<sup>®</sup>2 pozwala zwymiarować trzy rodzaje rurociągów w układzie odszraniania gorącymi parami:

1. **Główny rurociąg gorących par do odtajania.** Jest to rurociąg biegnący od króćca tłocznego sprężarki do kolektora rozdzielającego przepływ pary do poszczególnych parowników (od punktu A do B na poniższym schemacie).
2. **Rurociąg gorących par do odtajania.** Doprowadza on parę do danego parownika (od punktu B do C na schemacie poniżej).
3. **Rurociąg drenażowy skroplin.** Całkowicie lub częściowo skroplony czynnik z procesu odtajania odprowadzany jest tym rurociągiem z parownika do oddzielacza cieczy (od D do E).



W tych rurociągach zwykle występują następujące elementy automatyki:

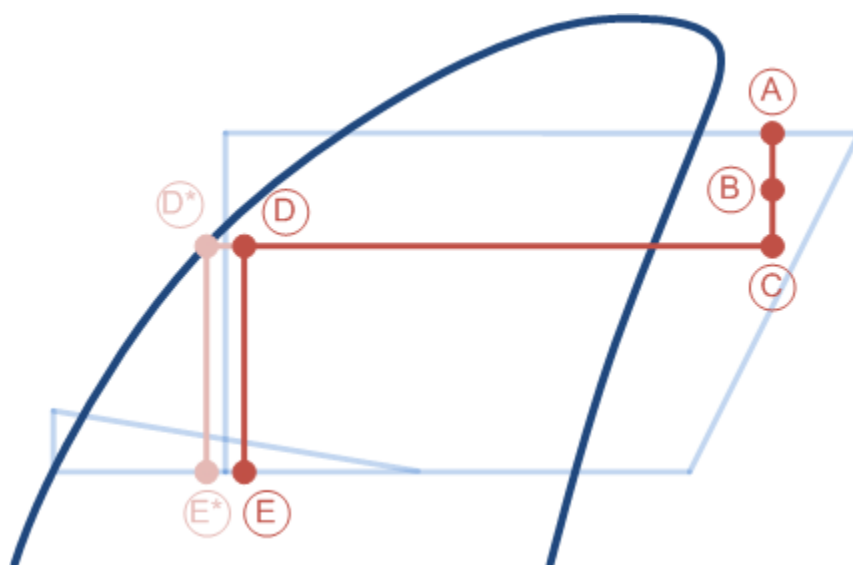
1. Główny rurociąg gorących par zawiera zawór stałego ciśnienia (ICS + pilot CVC - otwiera się przy spadku ciśnienia **za** zaworem, ogranicza wzrost ciśnienia) regulujący ciśnienie w punkcie B (w programie opcja ta nosi nazwę „regulated hot gas”, czyli „regulacja ciśnienia gorących par”).
2. Rurociąg gorących par jest wyposażony w zawór elektromagnetyczny otwierający i odcinający dopływ gorących par do danego parownika.
3. W rurociągu drenażu skroplin instaluje się alternatywnie jeden z dwóch elementów:
  - a. Zawór stałego ciśnienia (ICS + pilot CVP – otwiera się przy wzroście ciśnienia **przed** zaworem) regulujący ciśnienie w parowniku podczas odszraniania – jest to „odprowadzanie skroplin regulowane ciśnieniowo” („Pressure controlled drain”);
  - b. Zawór pływakowy, który kieruje do osuszacza ciecz powstałą w procesie odtajania – to rozwiązanie nazwano po prostu „drenażem skroplin” („Liquid drain”).

## 2. Parametry wejściowe

W celu określenia stanu gorących par czynnika chłodniczego wykorzystywanych do odszraniania, należy podać następujące dane:

- **Temperatura/ciśnienie skraplania.** Od temperatury skraplania zależy ciśnienie w punkcie A na poniższym wykresie.
- **Temperatura w głównym rurociągu gorących par.** Jest to temperatura w punkcie A. Może ona być równa temperaturze tłoczenia na wylocie ze sprężarki, chociaż zwykle jest nieco niższa, z uwagi na straty ciepła w rurociągu tłocznym.
- **Ciśnienie gorących par doprowadzanych do parownika.** To ciśnienie (czy też odpowiadająca mu temperatura nasycenia) dotyczy punktu B. Jest ono równe nastawie zaworu stałego ciśnienia w głównym rurociągu gorących par.
- **Ciśnienie w parowniku podczas odszraniania.** Jest to ciśnienie (bądź odpowiadająca mu temperatura nasycenia) panujące w punkcie D. Równa się ono nastawie zaworu stałego ciśnienia w rurociągu drenażowym skroplin (dla ciśnieniowo regulowanego odprowadzania skroplin).
- **Obliczeniowy stopień suchości.** Parametr ten zostanie omówiony dalej, przy czym pozwala on wyznaczyć gęstość czynnika chłodniczego wypływającego z parownika do elementów zainstalowanych w rurociągu drenażowym skroplin – wyznacza zatem położenie punktu D.
- **Temperatura parowania.** Od temperatury parowania zależy ciśnienie w punkcie E.

Położenie poszczególnych punktów pokazano na poniższym wykresie p-h:



Uwaga: Ciśnienie punktu C nie jest zadawane. Zostaje ono wyliczone z uwzględnieniem elementów obecnych w rurociągu gorących par. Na powyższym rysunku, punkty C i D mają jednakowe ciśnienie, lecz tak być nie musi.

Uwaga: Ciśnienie w punkcie D należy zadać także w przypadku odprowadzania skroplin przez zawór pływakowy (pomimo braku regulacji tego parametru). W rzeczywistości wynika ono ze spadków ciśnienia w zaworach układu odtajania i w parowniku. Natomiast dla celów obliczeniowych wystarczy zadać ciśnienie niższe niż w punkcie B o wartość odpowiadającą różnicy temperatury nasycenia rzędu kilku kelwinów.

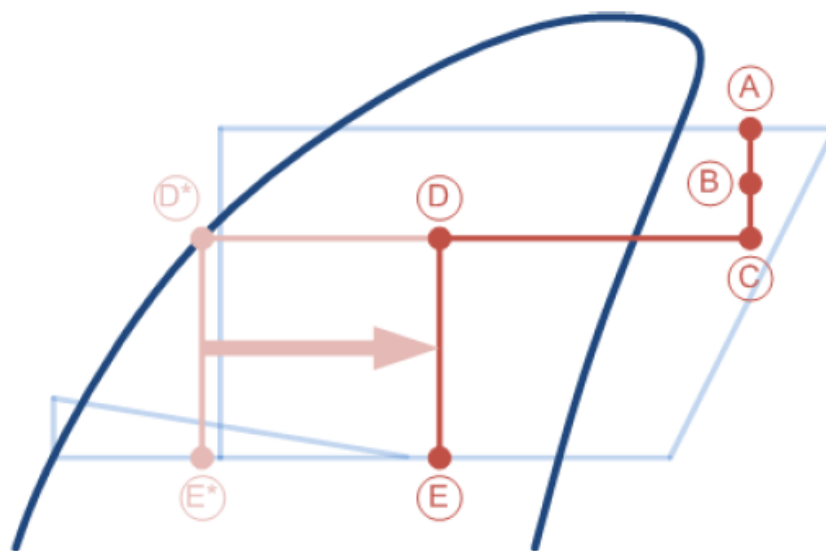
## 2.1. Obliczeniowy stopień suchości

Obliczeniowy stopień suchości na wylocie z parownika w procesie odtajania wyznacza położenie punktu D na początku przewodu drenażowego skroplin.

Z definicji stopień suchości stanowi miarę masowej zawartości pary nasyconej suchej w całej masie czynnika chłodniczego.

Na obliczeniową wartość stopnia suchości wpływa wybrana metoda regulacji odprowadzania skroplin:

- W przypadku drenażu skroplin przez zawór pływakowy obliczeniowy stopień suchości powinien zawsze równać się 0,0 – co oznacza, że czynnik chłodniczy w punkcie D ma postać cieczy nasyconej. Funkcją – czy też celem zastosowania – zaworu pływakowego w rurociągu drenażu skroplin jest właśnie zapobieżenie (na ile to możliwe) przepływowi pary, a umożliwienie przepływu jedynie cieczy;
- Przy ciśnieniowo regulowanym odprowadzaniu skroplin proces odszraniania przebiega nieco inaczej. Początkowo cała gorąca para wprowadzana do parownika ulega kondensacji, a do zaworu dopływa tylko ciecz. W miarę postępowania procesu, coraz większa część pary nie skrapla się, w wyniku czego do zaworu dociera mieszanina cieczy i pary. Zjawisko to zinterpretowano odcinkiem od punktu D\* do D na wykresie poniżej:



Prawidłowe określenie obliczeniowego stopnia suchości przy ciśnieniowo regulowanym odprowadzaniu skroplin ma ogromne znaczenie dla właściwego doboru wielkości drenażowego zaworu stałego ciśnienia:

- Zadanie wartości 0,0 (ciecz nasycona) skutkuje doбором stosunkowo małego zaworu, co może wydłużyć czas odszraniania w końcowej części tego procesu (z uwagi na małą wydajność przepływu pary);
- Wprowadziwszy wartość 1,0 (para nasycona sucha) otrzymuje się zawór relatywnie duży, zdolny do przepuszczania dużej ilości pary. Pociąga to jednak za sobą większe zużycie energii oraz groźbę niestabilnej pracy zaworu na początku procesu odtajania, gdy dociera doń tylko ciecz.

Zaleca się wprowadzanie do programu Coolselector<sup>®</sup>2 stosunkowo niskiej wartości obliczeniowej stopnia suchości na poziomie 0,05. Zapewnia ona stabilną pracę zaworu podczas przepływu cieczy oraz minimalizację ilości przepuszczanej pary.

## 2.2. Obliczeniowa wydajność cieplna

Sprecyzowanie obliczeniowej wydajności cieplnej podczas odszraniania jest równoznaczne z określeniem wymaganego masowego natężenia przepływu czynnika w układzie odtajania gorącymi parami.

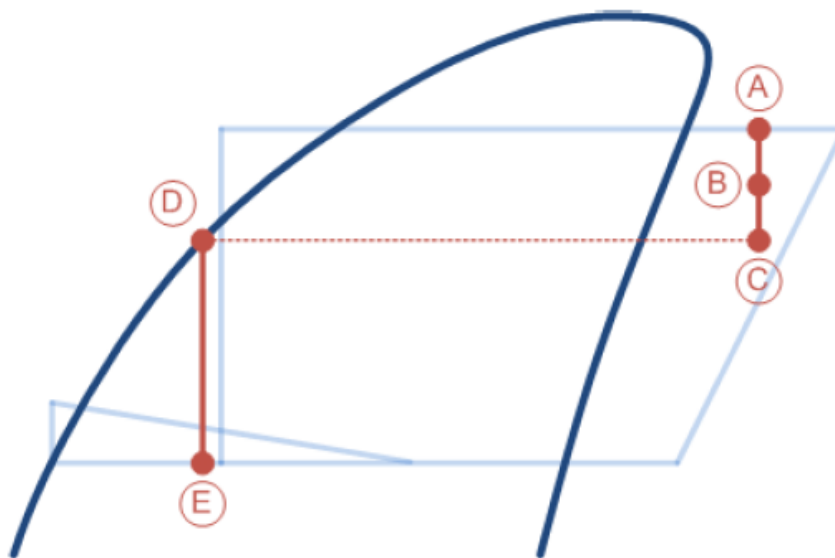
Wykorzystuje się tu zwykle zależności empiryczne, odnoszące się do nominalnej wydajności chłodniczej parownika (bądź parowników), do którego prowadzi rozważany rurociąg gorących par.

Oprogramowanie Coolselector<sup>®2</sup> wyznacza masowe natężenie przepływu gorących par w oparciu o wzór:

$$\dot{m}_{par} = \text{Współczynnik wydajności odtajania} \cdot \frac{\text{Wydajność chłodnicza}}{\text{Entalpia odtajania}}$$

*Wydajność chłodnicza* oznacza tu nominalną wydajność chłodniczą parownika (bądź parowników) odszranianego z danego przewodu gorących par. Pośrednio świadczy ona o wielkości tego wymiennika ciepła.

*Entalpia odtajania* opisuje ilość ciepła pobieraną przez 1 kg gorących par – jest to różnica entalpii jednostkowej między punktami C i D na poniższym wykresie:



*Współczynnik wydajności odtajania* dobierany jest na podstawie doświadczenia. Domyślną wartością w programie Coolselector<sup>®2</sup> jest 2,0. Zwykle zawiera się ona w przedziale od 1 do 3.

Zadanie wyższej wartości *współczynnika wydajności odtajania* skutkuje doбором większych zaworów i skróceniem czasu odszraniania. Analogicznie, przyjęcie wartości niższej zmniejsza rozmiary zaworów, lecz wydłuża czas procesu.

Ogólnie można stwierdzić, że konsekwencją doboru zbyt małych zaworów jest długi czas odszraniania.

Uwaga: Powyższe równanie służy także do zwymiarowania głównego rurociągu gorących par. W tym przypadku *wydajność chłodnicza* stanowi sumę nominalnych wydajności chłodniczych parowników, które mają być odtajane równocześnie.

### 3. Ciśnienie w parowniku podczas odszraniania

Jeśli gorące pary dostarczane są do parownika bezpośrednio z króćca tłocznej sprężarki, realna staje się możliwość wzrostu ciśnienia w tym wymienniku do poziomu ciśnienia skraplania. Może to stanowić zagrożenie, gdy parownik nie jest zaprojektowany na tak wysokie ciśnienie.

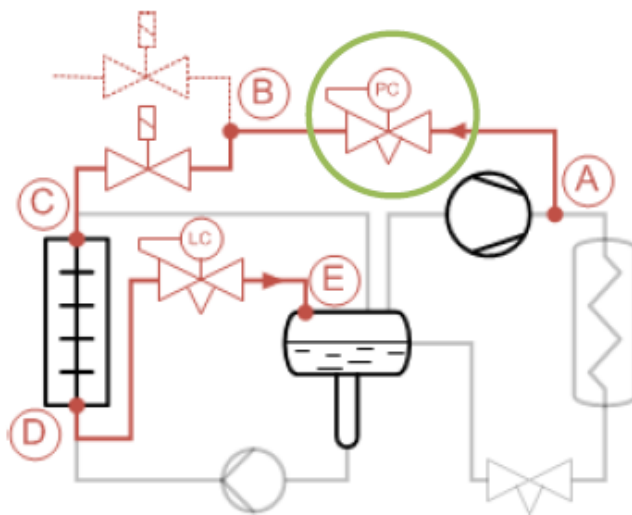
W przypadku ustalenia obliczeniowego stopnia suchości na poziomie 0,05 dla ciśnieniowo regulowanego odprowadzania skroplin, ciśnienie w parowniku może osiągnąć wartość ciśnienia skraplania pod koniec procesu odtajania. Dzieje się tak, gdyż drenażowy zawór stałego ciśnienia ma zbyt małą wydajność, aby odprowadzić z parownika całą nieskroploną parę przy niższym ciśnieniu.

Jeśli zaś skropliny są odprowadzane przez zawór pływakowy, to ciśnienie w parowniku pod koniec odszraniania zawsze zbliży się do ciśnienia skraplania – o ile w rurociągu gorących par nie zainstalowano żadnego zaworu redukującego ciśnienie.

Z kolei, wpisanie wyższej wartości obliczeniowego stopnia suchości (dla ciśnieniowej regulacji odprowadzania skroplin) skutkuje doбором zaworu stałego ciśnienia o przepustowości na tyle wysokiej, że pozwoli na odprowadzenie nieskroplonej pary przy niższym ciśnieniu, ale jednocześnie:

- zawór ten będzie pracował niestabilnie na początku odtajania,
- większe będzie zużycie energii (nieskroplona para jest źródłem strat energetycznych).

Jeśli wzrost ciśnienia w parowniku do wartości ciśnienia skraplania nie jest dozwolony – zarówno przy odprowadzaniu skroplin przez zawór stałego ciśnienia, jak i przez zawór pływakowy – to należy zainstalować zawór obniżający ciśnienie gorących par, jak pokazano na schemacie:





## 4. Wykres ciśnienia odszraniania

Po wybraniu w programie Coolselector<sup>®</sup>2 opcji doboru układu automatyki dla parownika („Evaporator Valve Station”) i po dokonaniu wstępnego wyboru, można włączyć ręczny tryb dostosowania poszczególnych elementów („Manual”):

W trybie ręcznym można dokonywać dowolnych zmian elementów automatyki w uwidocznionych czterech rurociągach, chociaż nie da się następnie powrócić do widoku ogólnego. Ręczny tryb pozwala z kolei na interpretację skutków poczynionych zmian na wykresie ciśnienia odszraniania w układzie współrzędnych ciśnienie („Pressure”) – masowe natężenie przepływu („Mass flow”), gdzie:

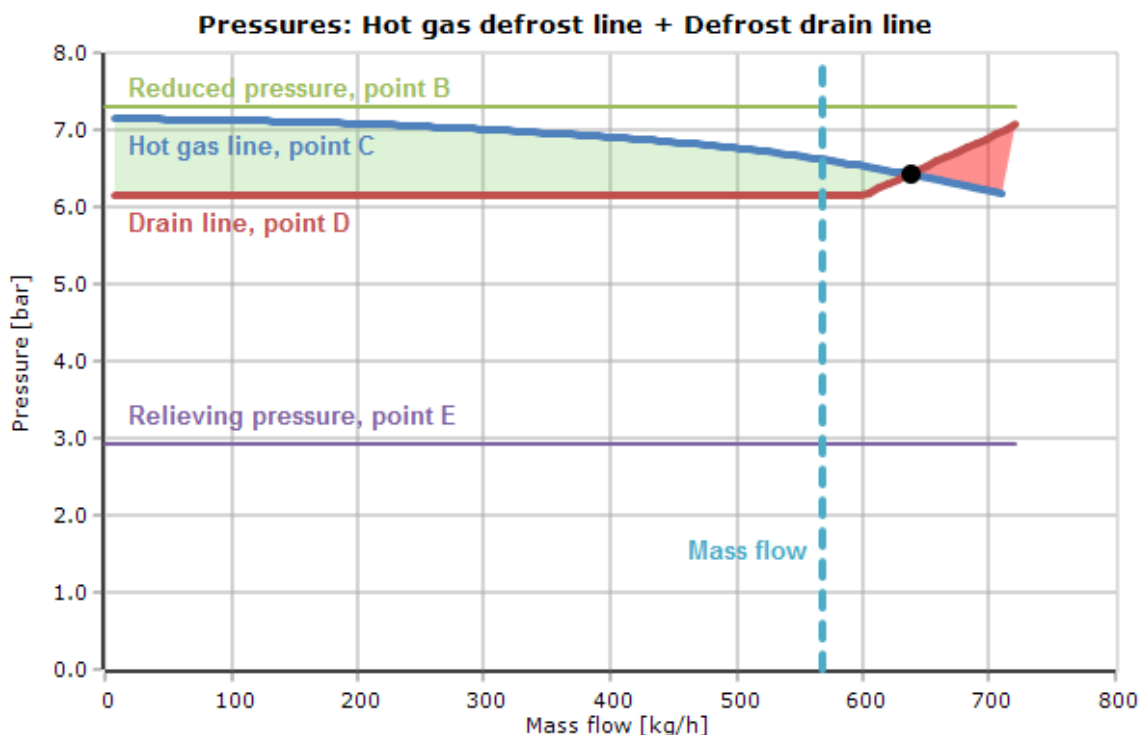
**Reduced pressure, point B** - ciśnienie za zaworem w głównym rurociągu gorących par, punkt B;

**Hot gas line, point C** - ciśnienie gorących par na dopływie do parownika, punkt C;

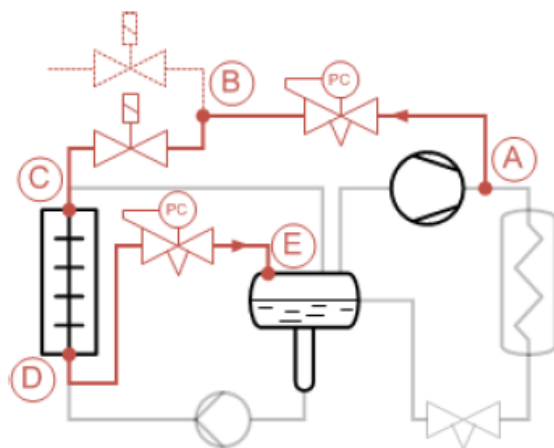
**Drain line, point D** - ciśnienie w rurociągu drenażowym skroplin, punkt D;

**Relieving pressure, point E** - ciśnienie w oddzielniku cieczy (za zaworem drenażowym), punkt E;

**Mass flow** - masowe natężenie przepływu (strumień masy) gorących par czynnika:



Wykres ciśnienia odszraniania przedstawia przebieg zmian ciśnienia na końcu przewodu gorących par (punkt C) oraz na początku przewodu drenażowego skroplin (punkt D):

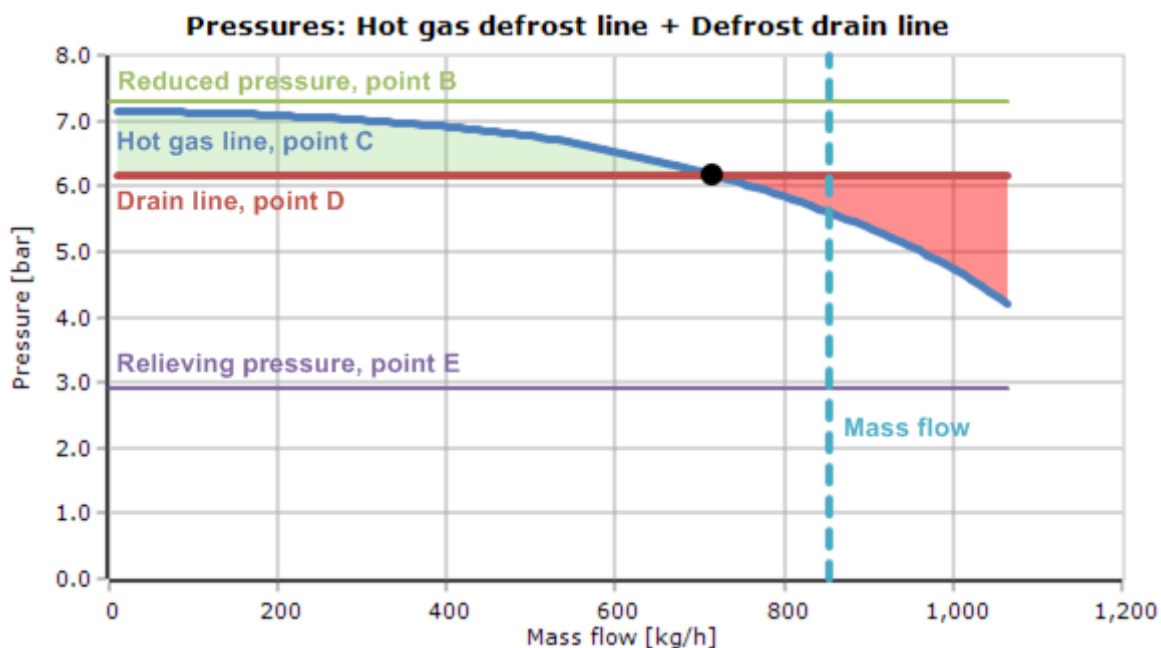


O ile na końcu przewodu gorących par nie dodano żadnych elementów symulujących spadek ciśnienia w parowniku, to wspomniane krzywe reprezentują ciśnienie na wlocie i wylocie z tego wymiennika ciepła. Zatem odstęp między tymi dwiema liniami ilustruje spadek ciśnienia możliwy do zaistnienia w parowniku.

W powyższym przykładzie, obliczeniowe natężenie przepływu (pionowa linia przerywana) określono tak, że na spadek ciśnienia w parowniku pozostawiono około 0,4 bar (odstęp między liniami C i D).

Jeśli zaś w programie uwzględniono spadek ciśnienia w parowniku (dodając stały spadek ciśnienia lub równoważny odcinek rurociągu w rurociągu gorących par), to masowe natężenie przepływu należy ustalić tak, aby było jak najbliższe punktowi przecięcia krzywych C i D – punkt ten zaznaczono na wykresie czarnym kółkiem.



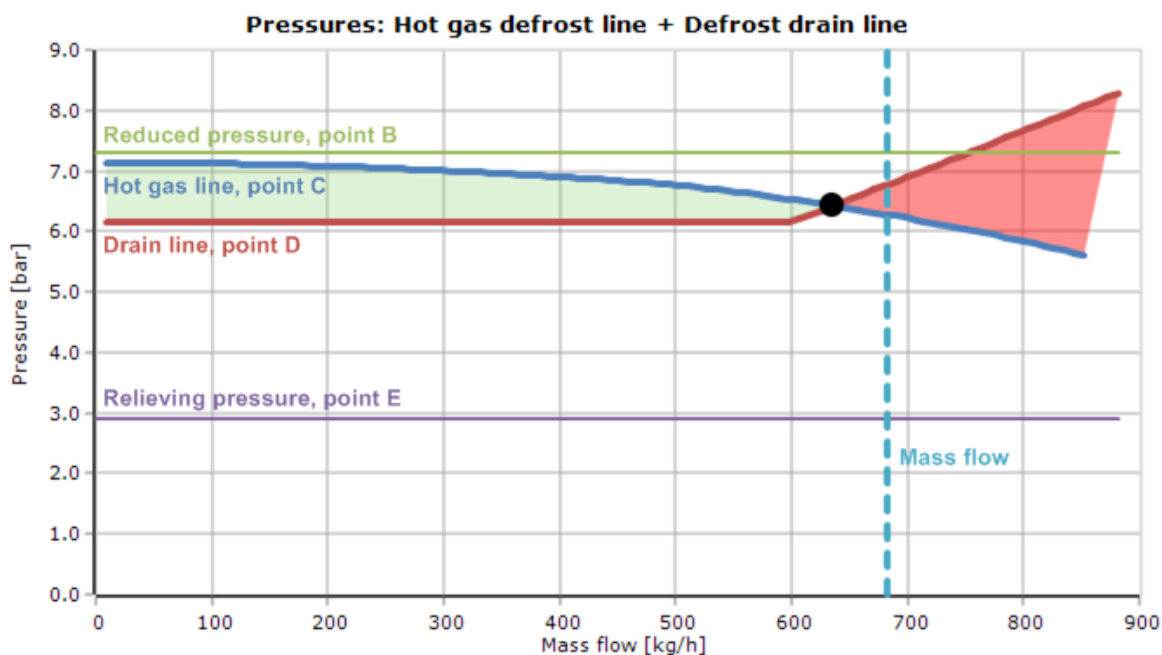


Z kolei, jeśli pionowa linia reprezentująca dobrane natężenie przepływu przecina zakreślony na czerwono obszar (zamiast pola zielonego lub czarnego punktu przecięcia), to oznacza, że ciśnienie w rurociągu gorących par miało by być niższe niż w rurociągu drenażowym, co oczywiście nie jest możliwe.

Aby naprawić ten błąd, należy wykonać jedną z następujących czynności:

1. Poniżyć ciśnienie za zaworem w głównym rurociągu gorących par (punkt B – schemat str. 10) – z uwzględnieniem pułapu ciśnienia skraplania (szczególną uwagę należy zachować przy układach o zmiennym ciśnieniu skraplania);
2. Zredukować masowe natężenie przepływu gorących par – kosztem dłuższego czasu odtajania;
3. Obniżyć ciśnienie odszraniania (ciśnienie w rurociągu drenażowym skroplin) – również kosztem wydłużenia czasu odtajania.

W przypadku zwiększenia obliczeniowego stopnia suchości (z założeniem, że zawór drenażowy powinien przepuszczać więcej pary) do tego stopnia, że zawór stałego ciśnienia w rurociągu drenażowym okaże się za mały i będzie pracować w pozycji pełnego otwarcia, wykres będzie wyglądał następująco:



Widać, że ciśnienie odszraniania (czerwona linia dla punktu D – schemat str. 10) przestaje utrzymywać się na stałym poziomie i rośnie wraz ze wzrostem natężenia przepływu powyżej maksymalnej przepustowości drenażowego zaworu stałego ciśnienia. W tym przykładzie maksymalna wydajność zaworu wynosi około 600 kg/h, zaś punkt przecięcia krzywych dla gorących par (C – schemat str. 10) i odprowadzanych skroplin (D – schemat str. 10) odpowiada natężeniu przepływu około 640 kg/h.

Przypadek ten ilustruje sytuację pod koniec procesu odszraniania, kiedy strumień czynnika chłodniczego dopływającego do zaworu drenażowego zawiera zwiększony udział pary. Gdy zawór okazuje się za mały, ciśnienie odszraniania rośnie, aż do stabilizacji w punkcie zaznaczonym czarnym kółkiem (o ile w rurociągu gorących par obliczeniowo uwzględniono spadek ciśnienia w parowniku).