

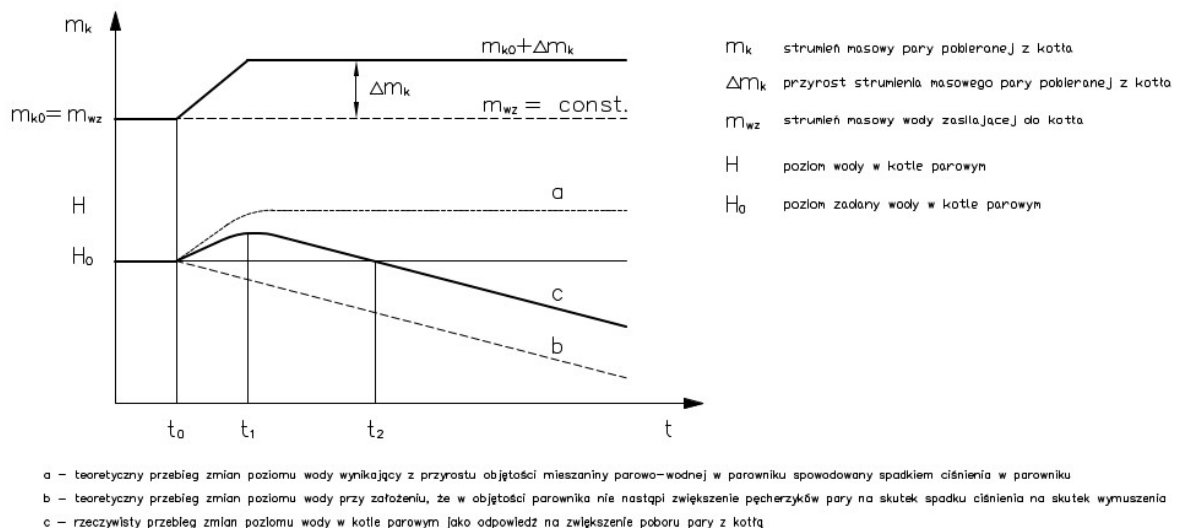
Krzysztof Szałucki

## MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA SYSTEMÓW AKUMULACJI CIEPŁA PODCZAS SZYBKICH ZMIAN OBCIĄŻENIA KOTŁA PAROWEGO OD STRONY POBORU PARY

### 1. Wytwarzanie pary w kotle parowym przy szybkich wymuszeniach od strony poboru pary

Podczas pracy zasilanych parą instalacji technologicznych bardzo często, szczególnie w podczas uruchamiania i wyłączania dużych odbiorników ciepła, obserwuje się gwałtowne zmiany zapotrzebowania pary produkowanej w kotle parowym. Szybkie zmiany zapotrzebowania pary przez odbiorniki są przyczyną gwałtownych zmian obciążenia kotła parowego, co może powodować szereg zaburzeń w jego poprawnej pracy.

Praca instalacji kotłowej w warunkach gwałtownych zmian obciążenia od strony poboru pary stawia szerokie wymagania. W przypadku gwałtownego wzrostu poboru pary z kotła następuje spadek ciśnienia, którego efektem jest chwilowy gwałtowny wzrost poziomu wody - rysunek 1 - oraz bardzo silne wzburzenie powierzchni wody na skutek zwiększenia objętości i intensywności powstawania pęcherzy parowych w objętości wodnej kotła. Zjawiska te powodują nie tylko fałszywe zadziałanie jednoimpulsowych regulatorów poziomu (ograniczenie dopływu wody zasilającej przy wzroście poziomu wody), ale również są przyczyną porywania wody kotłowej do instalacji parowej. Po wykorzystaniu efektów związanych z akumulacją ciepłą przestrzeni wodnej kotła poziom wody gwałtownie spada również na skutek doprowadzania znacznych ilości chłodniejszej wody zasilającej. Nieprawidłowe zadziałanie jednoimpulsowego regulatora poziomu, po chwilowym wzroście poziomu, może być przyczyną awaryjnego wyłączenia kotła z ruchu na skutek spadku poziomu wody poniżej najniższego dopuszczalnego konstrukcyjnie poziomu wody.



Rysunek 1. Zmiany poziomu wody jako odpowiedź na liniowe wymuszenie zmiany obciążenia od strony poboru pary z kotła

Krzysztof Szałucki:

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

Podczas gwałtownego wzrostu obciążenia kotła parowego od strony poboru pary następuje "fałszywy" wzrost poziomu wody oraz bardzo silne spienienie powierzchni lustra wody. Zjawiska te połączone ze wzrostem prędkości wypływu pary z kotła są przyczyną porywania wody kotłowej do instalacji parowej. Nadmierne ilości wody w parze są przyczyną występowania zjawisk erozyjnych, pogorszenia wymiany ciepła, a także niebezpiecznych termicznych uderzeń wodnych. Na skutek obecności znacznych ilości soli rozpuszczonych w wodzie kotłowej jej obecność w instalacji parowej jest również bardzo niebezpieczna dla rurociągów i ich armatury.

Podczas gwałtownego spadku obciążenia kotła parowego proces przebiega praktycznie odwrotnie, rośnie gwałtownie ciśnienie w kotle, w związku z tym pęcherze pary w pojemności wodnej ulegają zmniejszeniu. Poziom wody początkowo obniża się, co z kolei powoduje zwiększenie dopływu wody zasilającej przez system regulacji. W przypadku słabej nadażności układu paleniskowego za gwałtowną zmianą obciążenia, przy szybkim spadku obciążenia może dochodzić do otwarcia zaworu bezpieczeństwa, co jest przyczyną niepotrzebnych strat pary i okresowej niestabilności ciśnienia w instalacji.

Kotły parowe, szczególnie te charakteryzujące się stosunkowo niewielką objętością wodną, są najczęściej najbardziej podatne zakłócenia w pracy podczas szybkich wymuszeń od strony poboru pary. Oznacza to, że do grupy kotłów parowych najbardziej zagrożonych podczas szybkich wymuszeń od strony poboru pary można zaliczyć: przemysłowe kotły wodnorurkowe, a także nowoczesne kotły płomienicowo-płomieniówkowe, gdzie producenci celowo zmniejszają pojemność wodną, przede wszystkim w celu obniżenia kosztów wytwarzania. Oczywiście pojemność wodna kotła nie jest jedynym elementem decydującym o odpowiedzi kotła na wymuszenie, są również inne ważne aspekty np. szybkość zmian odpowiedzi urządzenia paleniskowego, sposób regulacji poziomu w kotle itp., ale to głównie akumulacja ciepła w wodzie kotłowej znacząco łagodzi odpowiedź kotła na szybkie wymuszenie od strony poboru pary.

Odpowiedź kotła oraz całej instalacji parowej na szybkie wymuszenia od strony poboru pary powinna być elementem zapewniającym stabilizację pracy instalacji parowej pod kątem przepływu i ciśnienia pary dla zapewnienia poprawnego i bezpiecznego przebiegu procesu technologicznego.

## **2. Metody zapobiegania skutkom szybkich zmian obciążenia**

Można zaobserwować wiele różnych rozwiązań stosowanych przez użytkowników instalacji parowych głównie w celu ograniczenia nadmiernych spadków ciśnienia w kotłach występujących podczas szybkich wymuszeń od strony poboru pary. Stosowane rozwiązania mają przede wszystkim na celu poprawienie warunków stabilności pracy kotła przy szybko zmiennych obciążeniach, niektóre dodatkowo zapewniają utrzymanie parametrów w całej instalacji parowej. Poniżej krótko omówiono najczęściej stosowane metody zapobiegania skutkom szybkich zmian obciążenia.

### **2.1.Zastosowanie kotła o dużej pojemności wodnej lub równoczesna praca kilku kotłów**

Kotły płomienicowo-płomieniówkowe produkowane ponad 20-30 lat temu miały znacząco większą objętość wodną (wyższa cena i dłuższy czas rozruchu ze stanu zimnego) od produkowanych obecnie. Jeżeli porównamy pojemności wodne kotłów z lat 50-tych i współczesnych, to we współczesnych kotłach (o tej samej wydajności produkowanej pary) pojemność wodna jest 4-5 krotnie mniejsza. Większa pojemność wodna zapewniała

*Krzysztof Szałucki:*

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

dużo większe (4-5 krotnie większe) własności akumulacji ciepła w tej właśnie pojemności. Dzięki temu starsze kotły wyposażone urządzenia paleniskowe o niskiej nadążności (np. ruszty mechaniczne, palniki jedno lub dwu-stopniowe) mogły w miarę stabilnie pracować podczas szybkich wymuszeń, wykorzystując parę z akumulacji, bez niebezpiecznego dla kotła znaczącego spadku ciśnienia.

Współcześnie oferowane kotły ze względu na małe pojemności wodne (słaba akumulacja ciepła w wodzie) wyposażane są w palniki modulowane o krótkim czasie reakcji na zmiany obciążeń w zakresie regulacji. Jednakże szczególnie przy szybkich wymuszeniach od strony poboru pary na skutek opóźnień w reakcji urządzenia paleniskowego i kotła, często obserwowane są przypadki nadmiernie gwałtownych spadków ciśnienia w kotłach prowadzące do opisanych wcześniej negatywnych zjawisk. Zdarza się również, że dochodzi wówczas do zatrzymania pracy kotła od przekroczenia niskiego poziomu wody, co wpływa na poprawność procesów technologicznych w zakładzie przemysłowym. Jeżeli kotłownia wyposażona jest w więcej niż jeden kocioł, to można się bronić przed tym zjawiskiem przez wdrożenie równoczesnej pracy dwóch lub więcej kotłów. Dzięki zwiększeniu sumarycznej akumulacji ciepła w pojemnościach wodnych kotłów odpowiedź zespołu kotłów na szybkie wymuszenie może być o wiele bardziej łagodna niż w przypadku pracy pojedynczego kotła. Praca równoczesna kilku kotłów może być nieekonomiczna z punktu widzenia zużycia paliwa (rozkład sprawności kotłów przy niskich obciążeniach oraz dodatkowa strata do otoczenia), wobec tego wymaga uzasadnienia z punktu widzenia faktycznych zagrożeń niestabilnością pracy przy wymuszeniach od strony poboru pary.

## **2.2. Zwiększenie nadążności urządzenia paleniskowego**

Zastosowanie urządzeń paleniskowych o wysokiej nadążności może pomóc w stabilizacji parametrów roboczych kotła podczas zmian obciążeń. Palniki modulowane czy też w pełni zautomatyzowane ruszty mechaniczne zapewniają dużo lepszą stabilizację parametrów roboczych kotła przy zmianach obciążenia niż palniki jedno czy dwu-stopniowe lub ręcznie regulowane ruszty mechaniczne. W oparciu o analizę szybkości zmian obciążeń spowodowanych wymuszeniami od strony poboru pary, można przewidzieć czy zwiększenie nadążności urządzenia paleniskowego będzie wystarczającym elementem modernizacji kotła dla zapewnienia jego stabilnej pracy. Jeżeli na instalacji parowej zabudowany jest czujnik przepływu pary i znana jest zmienność przepływu, to w oparciu o obliczenia możliwości akumulacyjnych kotła można z dużą dokładnością stwierdzić czy zmiana urządzenia paleniskowego na bardziej nadążne zapewni odpowiednią stabilizację.

## **2.3. Zastosowanie trójimpulsowej regulacji poziomu wody w kotle**

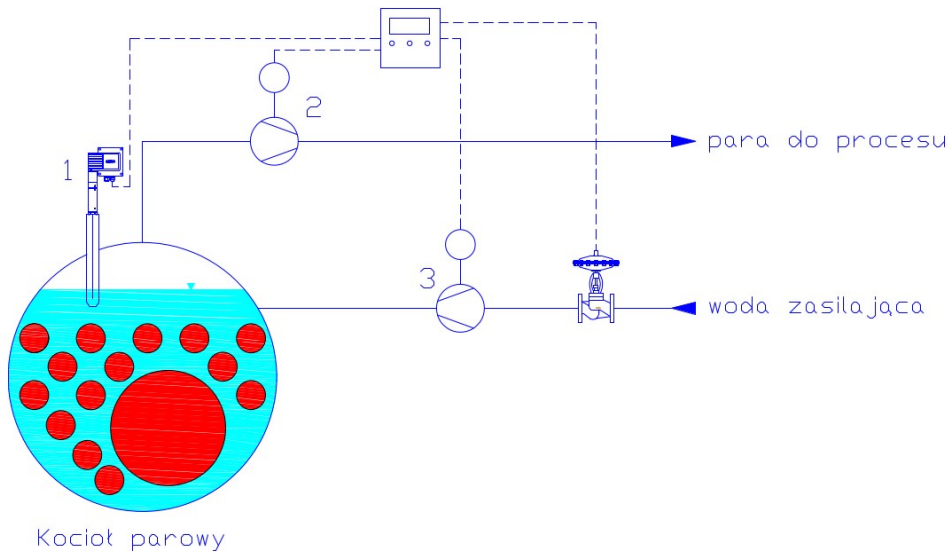
Skutki gwałtownych zmian obciążeń mieszczących się w zakresie obciążalności kotła (nie skutkujące spadkiem ciśnienia pary poniżej dopuszczalnego przez instalację kotłową minimum) można również ograniczyć poprzez zastosowanie trójimpulsowego systemu regulacji poziomu wody w kotle parowym. Trójimpulsowy system regulacji dopływu wody zasilającej do kotła, przedstawiony na rysunku 2, jest zalecany w przypadkach, gdy ilość pary dostarczanej do procesu technologicznego nie może być ograniczona, a zmiana obciążenia mieści się w zakresie dopuszczalnych zmian obciążalności kotła oraz kiedy przede wszystkim konieczne jest przeciwdziałanie występowaniu niepożądanych awaryjnych odstawień kotła parowego z ruchu na skutek spadku poziomu wody poniżej poziomu dopuszczalnego.

*Krzysztof Szałucki:*

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

Przy trójimpulsowej regulacji poziomu w układzie pomiarowym regulatora mierzone są: 1. odchyłka poziomu wody od wartości zadanej, 2. obciążenie masowe wytwornicy pary oraz 3. natężenie dopływu wody zasilającej. Pomiar poziomu w tej metodzie regulacji jest korygowany pod kątem zróżnicowania przepływów wody i pary.

Dzięki zastosowaniu trójimpulsowego systemu regulacji poziomu wody w kotle parowym unika się błędu regulacji, polegającego na zamykaniu dopływu wody zasilającej w momencie uzyskania wskazania o wzroście poziomu wody bez analizy zmian obciążenia kotła od strony pary. Błąd ten popełniany jest szczególnie w przypadku wykorzystywania układów jednoimpulsowych regulatorów poziomu.



Rysunek 2. System trójimpulsowej regulacji dopływu wody zasilającej - jako zabezpieczenie kotła parowego przed skutkami gwałtownych zmian obciążenia od strony pary bez ograniczenia ilości pary podawanej do procesu technologicznego.

Obecnie w większości przypadków obiektów kotłowych montuje się jako wyposażenie standardowe elektrodę pojemnościową dla ciągłego pomiaru poziomu oraz układ pomiarowy ilości pary produkowanej przez kocioł parowy. Wobec powyższego dla uzyskania możliwości realizacji trójimpulsowego systemu regulacji dopływu wody zasilającej konieczne jest uzupełnienie istniejącego systemu o układ pomiaru przepływu wody zasilającej oraz trójimpulsowy regulator poziomu. Zarówno nowoczesne systemy pomiarowe przepływu wody jak i seryjnie produkowane trójimpulsowe regulatory poziomu stanowią niewielki procent kosztów kompletu automatyki kotłowej. Trójimpulsowy układ regulacji poziomu zastosowany na nowoczesnym obiekcie kotłowym nie stanowi kosztowo znaczącej pozycji, dając nieporównywalnie wysokie bezpieczeństwo i stabilność pracy kotła parowego przy gwałtownych zmianach obciążenia od strony pary.

Trzeba jednakże pamiętać, iż układ trójimpulsowej regulacji poziomu nie zabezpiecza całkowicie przed konsekwencjami związanymi z niedopuszczalnym przeciążeniem kotła.

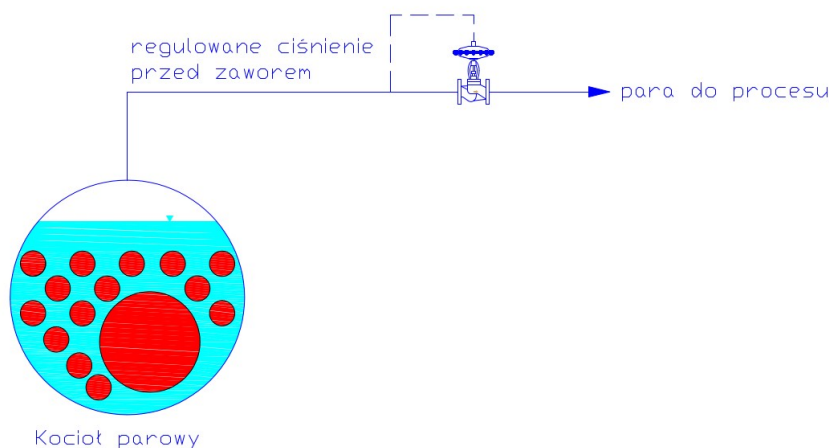
## 2.4. Zastosowanie zaworów nadmiarowych

Dla zapewnienia efektu stabilizacji ciśnienia metodą mechanicznego ograniczenia nadmiernego obciążenia kotła od strony poboru pary, konieczne jest zainstalowanie zaworu regulacji ciśnienia pary za głównym zaworem parowym kotła lub ewentualnie tylko na rurze zasilającej część instalacji parowej odpowiedzialną za szybkie wymuszenia

Krzysztof Szałucki:

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

obciążeń. Jego zadaniem będzie utrzymywanie stałego ciśnienia od strony napływu pary, czyli również w kotle. Skutkiem gwałtownego wzrostu zapotrzebowania pary przez odbiorniki ciepła będzie spadek ciśnienia pary w systemie. Odpowiedzią na obniżenie się ciśnienia mierzonego przed zaworem będzie zmniejszenie przekroju przepływowego pary w zaworze regulacji ciśnienia, czyli ograniczenie przepływu pary. Poprzez ograniczenie podaży pary, ciśnienie przed zaworem utrzymane zostanie na oczekiwanym stabilnym poziomie. Dzięki temu również ciśnienie w kotle będzie stabilne i unikniemy niepożądanych skutków gwałtownych zmian obciążeń kotła od strony poboru pary. W przypadku, gdy gwałtowne zmiany obciążenia obserwujemy jedynie na jednej lub kilku gałęziach instalacji parowych często wystarczające jest zainstalowanie takiego układu stabilizacji ciśnienia na tych właśnie gałęziach instalacji.



Rysunek 3. Zawór nadmiarowy jako zabezpieczenie kotła parowego przed spadkiem ciśnienia na skutek wzrostu obciążenia od strony pary (powoduje ograniczenie ilości pary podawanej do procesu technologicznego).

Wydaje się, że najbardziej uzasadnione z punktu widzenia jakości działania, prostej konstrukcji i ekonomii jest zastosowanie zaworu bezpośredniego działania zapewniającego utrzymywanie stałego ciśnienia przed zaworem. Takim zaworem może być na przykład zawór nadmiarowy pracujący w funkcji stabilizatora ciśnienia - rysunek 3. Należy zaznaczyć, że proponowane dla zapewnienia stabilizacji ciśnienia rozwiązanie spowoduje ograniczenie ilości pary dostarczanej do odbiorników, co w sposób znaczący ograniczy szybkość ich nagrzewania, a może również spowodować chwilowe niedobory w ilości dostarczanego ciepła. Należy sobie zdawać sprawę, że rozwiązanie to można zastosować, gdy chwilowe ograniczenie dopływu pary nie będzie miało znaczenia na poprawność procesu technologicznego.

## 2.5. Zarządzanie zużyciem pary

Zarządzanie zużyciem pary w zakładzie polega na bardzo ścisłym sformalizowaniu czasów uruchamiania, zatrzymywania lub utrzymywania w ruchu poszczególnych odbiorników ciepła. Odpowiednie ustawienie pracy urządzeń pod kątem zużycia pary zapewnia wysoką stabilizację parametrów i bardzo niski poziom zmienności wymuszeń od strony poboru pary. Należy jednak zwrócić uwagę, że bardzo ściśle panowanie nad systemem odbiorników jest praktycznie możliwe tylko w przypadku pełnej automatyzacji procesów ze sterownikiem nadrzędnym kontrolującym równocześnie pracę poszczególnych urządzeń.

Krzysztof Szałucki:

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

Zarządzanie zużyciem pary, o ile jest wprowadzone w zakładzie, zazwyczaj ogranicza się do ustalenia momentów załączeń odbiorników charakteryzujących się największym zużyciem pary podczas rozruchu oraz zapewnienia wymaganego czasu rozruchu. Powszechne uruchamianie urządzenia jednym przyciskiem, który powoduje pełne otwarcie zaworu dopływu pary do zimnego urządzenia skutkuje gwałtownym wymuszeniem i wzrostem obciążenia na kotle. Szczególnie bolesne jest zjawisko przy pracy jednozmianowej, kiedy pracownicy równocześnie uruchamiają szereg zimnych urządzeń, wówczas na nieprzygotowanej i pracującej na minimum kotłowni dochodzi do przeciążenia kotła (czasami nawet do wysysania wody z kotła z pobieraną parą).

Podniesienie świadomości pracowników w zakresie rozruchu instalacji parowych jest bardzo pożądane. Kompleksowe zarządzanie zużyciem pary możliwe, ale raczej mało prawdopodobne bez całkowitej automatyzacji procesów.

## 2.6. Zastosowanie akumulatora ciepła

Z punktu widzenia użytkownika optymalnym rozwiązaniem byłoby zabudowanie na instalacji takiego urządzenia, które poda odpowiednią ilość pary dodatkowej do procesu w momencie wzrostu zapotrzebowania i równocześnie pobierze nadwyżkę pary podczas spadku zapotrzebowania pary w procesach technologicznych zakładu. Urządzeniem zapewniającym taką pracę będzie akumulator ciepła.

Zastosowanie systemu akumulacji ciepła polega na zabudowie suchego lub mokrego akumulatora, który wykorzystując proces akumulacji ciepła w przestrzeni parowej lub wodnej, w odpowiednim momencie, zgodnie z potrzebami instalacji będzie ładowany lub uwolni pewną ilość pary. Zabudowa systemu akumulacji ciepła (szczególnie akumulacji mokrej) w instalacji parowej zapewni znaczące złagodzenie szybkości zmian obciążeń podczas szybkich wymuszeń od strony odbiorników pary. Dobrze zaprojektowany i doregulowany system akumulacji ciepła gwarantuje zarówno stabilizację parametrów w instalacji parowej jak również wpłynie na stabilizację parametrów pracy kotła.

## 3. Akumulacja ciepła

System akumulacji ciepła w instalacji parowej, najczęściej oparty jest na gromadzeniu w odpowiednio przygotowanych zbiornikach, określonych ilości masowych pary lub wody w stanie wrzenia przy możliwie wysokich ich ciśnieniach. Uwolnienie części magazynowanego ciepła, dzięki czemu uzyskiwany jest dodatkowy strumień pary, polega bądź na zmianie objętości właściwej pary zachodzącej podczas spadku jej ciśnienia (w przypadku akumulacji ciepła w parze), bądź też na wykorzystaniu procesu odparowania wtórnego wody wrzącej podczas jej rozprężania (w przypadku akumulacji ciepła w wodzie wrzącej). Układ akumulacji realizowanej w objętości parowej nazywamy akumulatorem suchym, układ realizowany w objętości wody gorącej akumulatorem mokrym. Z procesu akumulacji uwalniamy pewne ilości pary, która wcześniej musiała zostać wyprodukowana i zakumulowana. Mylnie jest stwierdzenie, że akumulator ciepła produkuje parę.

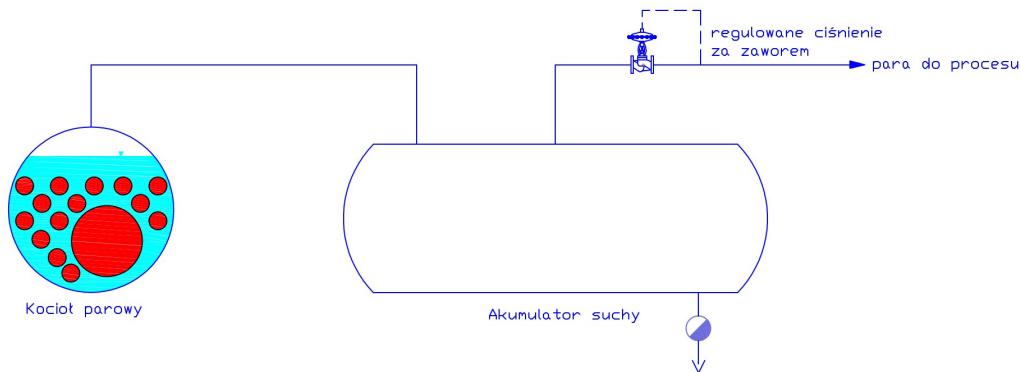
### 3.1. W przestrzeni parowej – akumulator suchy

Akumulator suchy to nic innego jak zbiornik o określonej pojemności wypełniamy parą o ciśnieniu wyższym (najczęściej o ciśnieniu źródła) niż wykorzystywane w instalacji parowej. Im wyższe ciśnienie pary magazynowanej w zbiorniku akumulatora suchego tym większe możliwości akumulacyjne. W momencie wzrostu zapotrzebowania pary w instalacji o niższym ciśnieniu otwiera się zawór – rysunek 4 – dopuszczający parę

*Krzysztof Szałucki:*

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

z akumulatora. Dodatkowy strumień pary możliwy do wykorzystania uzyskiwany jest na skutek zwiększenia objętości właściwej pary przy spadku jej ciśnienia.



Rysunek 4. Akumulator suchy

Masę pary z akumulatora suchego  $m_{pS}$  [kg], którą można wykorzystać na skutek wzrostu objętości spowodowanego obniżeniem ciśnienia zakumulowanej pary można wyznaczyć w oparciu o wzór:

$$m_{pS} = \frac{V_{zbiornika} \times (\vartheta_2'' - \vartheta_1'')}{\vartheta_2'' \times \vartheta_1''} [1]$$

gdzie:

$V_{zbiornika}$  [m<sup>3</sup>] – pojemność całkowita zbiornika

$\vartheta_1''$  [m<sup>3</sup>/kg] – objętość właściwa pary nasyconej przy ciśnieniu ładowania (wyższym)

$\vartheta_2''$  [m<sup>3</sup>/kg] – objętość właściwa pary nasyconej przy ciśnieniu rozładowania (niższym)

Dla późniejszego porównania tych zdolności akumulacyjnych ze zdolnością akumulacji systemu akumulatora mokrego wyznaczona została przykładowa masa pary  $m_{pS}$ , którą można wykorzystać na skutek wzrostu objętości spowodowanego obniżeniem ciśnienia zakumulowanej pary dla następujących danych:

$V_{zbiornika} = 1,0$  [m<sup>3</sup>] – objętość zbiornika akumulatora suchego

$\vartheta_1'' = 0,1408$  [m<sup>3</sup>/kg] – objętość właściwa pary nasyconej przy ciśnieniu ładowania 13barg

$\vartheta_2'' = 0,2728$  [m<sup>3</sup>/kg] – objętość właściwa pary nasyconej przy ciśnieniu rozładowania 6barg

$$m_{pS} = \frac{1 \times (0,2728 - 0,1408)}{0,2728 \times 0,1408} = 3,44 [kg]$$

Zastosowanie suchego akumulatora pary o pojemności 1m<sup>3</sup> naładowanego parą nasyconą o ciśnieniu 13barg umożliwia na skutek rozładowania do ciśnienia 6barg wykorzystać 3,44 kg pary. Przyjmując, że w systemie obserwowane są wzrosty obciążenia trwające ok. 30 sekund (po których następuje spadek zapotrzebowania poniżej wartości średniej co umożliwia ponowne ładowanie akumulatora), to 3,44 kg dodatkowo uwolnionej pary 6 barg odpowiada wzrostowi wydajności instalacji o ok. 412 kg/h przez 30 sekund lub 100 kg/h przez ok. 2 minuty. Podsumowując suchy akumulator pary może pomóc w stabilizacji krótkotrwałych i stosunkowo niedużych wzrostów zapotrzebowania pary.

Bardzo specyficznym suchym akumulatorem ciepła jest cała instalacja parowa, czyli sieć rurociągów oraz rozdzielacze pary. Oczywiście w sieci parowej niedopuszczalne są duże

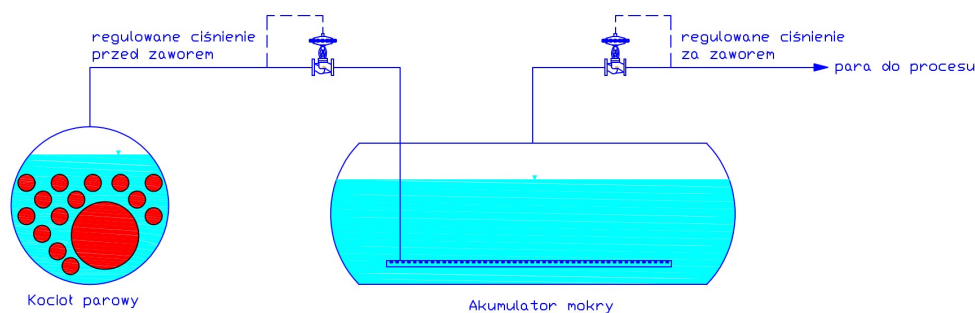
Krzysztof Szałucki:

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

spadki ciśnienia, ale jeżeli akceptowalny jest niewielki spadek ciśnienia, to dzięki zdolności akumulacji ciepła w parze, sieć parowa staje się stabilizatorem niewielkich szybkich zmian obciążeń.

### 3.2. W przestrzeni wodnej – akumulator mokry

Akumulator mokry, często nazywany również zasobnikiem Ruts'a - rysunek 5 - to również zbiornik jednak wypełniony w znacznej części wodą w stanie wrzenia przy ciśnieniu wyższym (najczęściej ciśnieniu źródła) niż panujące w instalacji parowej. Im wyższa różnica ciśnień między ciśnieniem ładowania i rozładowania tym większe zdolności akumulacyjne. W przypadku akumulatora mokrego dodatkowy strumień pary uzyskiwany jest w procesie odparowania wtórnego wody wrzącej podczas spadku jej ciśnienia, czyli rozładowywania akumulatora mokrego. Przestrzeń parowa wypełniająca zbiornik nad objętością wodną można uznać za dodatkowy akumulator suchy.



Rysunek 5. Akumulator mokry

Ciepło zgromadzone w pojemności wody wrzącej akumulatora mokrego przy wysokim ciśnieniu jest większe, od tego które może pozostawać w objętości wodnej po obniżeniu ciśnienia, nadwyżka ciepła powoduje częściowe odparowanie rozprężanej wody w akumulatorze. Masę pary uwalnianej z wody wrzącej podczas rozładowania akumulatora mokrego  $m_{pMw}$  [kg], można wyznaczyć ze wzoru [2]:

$$m_{pMw} = \frac{n \times V_{zbiornika} \times (h'_1 - h'_2)}{100 \times \vartheta'_1 \times (h''_2 - h'_2)} \quad [2]$$

gdzie (legenda dotyczy również kolejnych wzorów od [3] do [9]):

- $V_{zbiornika}$  [m<sup>3</sup>] – pojemność całkowita zbiornika akumulatora
- $n$  [%] – procentowo ilość wody w całkowitej pojemności naładowanego zbiornika akumulatora
- $h'_1$  [kJ/kg] – entalpia wody wrzącej przy ciśnieniu ładowania (wyższym)
- $h'_2$  [kJ/kg] – entalpia wody wrzącej przy ciśnieniu rozładowania (niższym)
- $h''_2$  [kJ/kg] – entalpia pary nasyconej przy ciśnieniu rozładowania (niższym)
- $\vartheta'_1$  [m<sup>3</sup>/kg] – objętość właściwa wody wrzącej przy ciśnieniu ładowania (wyższym)
- $\vartheta'_2$  [m<sup>3</sup>/kg] – objętość właściwa wody wrzącej przy ciśnieniu rozładowania (niższym)
- $\vartheta''_1$  [m<sup>3</sup>/kg] – objętość właściwa pary nasyconej przy ciśnieniu ładowania (wyższym)
- $\vartheta''_2$  [m<sup>3</sup>/kg] – objętość właściwa pary nasyconej przy ciśnieniu rozładowania (niższym)

Wzór [2] obejmuje jedynie możliwości akumulacji w przestrzeni wodnej akumulatora mokrego, należy jednak pamiętać, że proces akumulacji również obejmuje część parową akumulatora mokrego. W związku z tym masa pary  $m_{pMs}$  uzyskiwanej w procesie rozładowania pojemności parowej akumulatora mokrego wyznaczana powinna być w oparciu o wzór [3]:

Krzysztof Szałucki:

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

$$m_{pMs} = \frac{(100-n) \times V_{zbiornika} \times (\vartheta_2'' - \vartheta_1'')}{100 \times \vartheta_2'' \times \vartheta_1''} \quad [3]$$

Po zakończeniu procesu odparowania wody na skutek spadku ciśnienia pojemność wodna akumulatora mokrego ulegnie zmniejszeniu o objętość odparowanej wody. Dodatkowo na skutek zmiany objętości właściwej wody wrzącej w procesie rozładowania nastąpi pewne zmniejszenie pojemności wodnej akumulatora mokrego. Zmiana pojemność musi zostać uzupełniona za pomocą pary z akumulacji, para z akumulacji wypełniająca tę dodatkową pojemność nie może być wykorzystana w technologii. Masę pary  $m_{pMu}$  [kg], która musi być wykorzystana z tego powodu możemy określić za pomocą wzoru [4].

$$m_{pMu} = \frac{\frac{n}{100} \times V_{zbiornika} \times \left(1 - \frac{\vartheta_2'}{\vartheta_1'}\right) + m_{pMw} \times \vartheta_2'}{\vartheta_2''} \quad [4]$$

Ostatecznie wzór na masę pary uwalnianej w procesie rozładowania mokrego akumulatora  $m_{pM}$  [kg] możemy wyznaczyć w oparciu o wzór [5], a podstawiając wzory [2],[3],[4] do [5] uzyskamy wariant złożony [6] lub ostateczną formę wykorzystywaną do obliczeń [7] lub [8].

$$m_{pM} = m_{pMw} + m_{pMs} - m_{pMu} \quad [5]$$

$$m_{pM} = \frac{n \times V_{zbiornika} \times (h_1' - h_2')}{100 \times \vartheta_1' \times (h_2'' - h_2')} + \frac{(100-n) \times V_{zbiornika} \times (\vartheta_2'' - \vartheta_1'')}{100 \times \vartheta_2'' \times \vartheta_1''} - \frac{\frac{n}{100} \times V_{zbiornika} \times \left(1 - \frac{\vartheta_2'}{\vartheta_1'}\right) + m_{pMw} \times \vartheta_2'}{\vartheta_2''} \quad [6]$$

lub po przekształceniu

$$m_{pM} = \frac{V_{zbiornika}}{100} \times \left[ \frac{n \times (h_1' - h_2')}{\vartheta_1' \times (h_2'' - h_2')} \times \left(1 - \frac{\vartheta_2'}{\vartheta_2''}\right) + \frac{(100-n) \times (\vartheta_2'' - \vartheta_1'')}{\vartheta_2'' \times \vartheta_1''} - \frac{n}{\vartheta_2''} \times \left(1 - \frac{\vartheta_2'}{\vartheta_1'}\right) \right] \quad [7]$$

Dla porównania zdolności akumulacyjnych akumulatora mokrego ze zdolnością akumulacji systemu akumulatora suchego wyznaczona została przykładowa masa pary  $m_{pM}$ , którą można uzyskać w wyniku rozładowania akumulatora mokrego, dla danych zbieżnych z przyjętymi podczas obliczeń możliwości akumulacyjnych akumulatora suchego:

$V_{zbiornika} = 1,0$  [m<sup>3</sup>]

$n = 50$  [%] – procentowo ilość wody w całkowitej pojemności naładowanego zbiornika akumulatora

$h_1' = 830,13$  [kJ/kg] – entalpia wody wrzącej przy ciśnieniu ładowania 13 barg

$h_2' = 697,14$  [kJ/kg] – entalpia wody wrzącej przy ciśnieniu rozładowania 6 barg

$h_2'' = 2762,7$  [kJ/kg] – entalpia pary nasyconej przy ciśnieniu rozładowania 6 barg

$\vartheta_1' = 0,00115$  [m<sup>3</sup>/kg] – objętość właściwa wody wrzącej przy ciśnieniu ładowania 13 barg

$\vartheta_1'' = 0,1408$  [m<sup>3</sup>/kg] – objętość właściwa pary nasyconej przy ciśnieniu ładowania 13 barg

$\vartheta_2' = 0,00111$  [m<sup>3</sup>/kg] – objętość właściwa wody wrzącej przy ciśnieniu rozładowania 6 barg

$\vartheta_2'' = 0,2728$  [m<sup>3</sup>/kg] – objętość właściwa pary nasyconej przy ciśnieniu rozładowania 6 barg

$$m_{pMw} = \frac{50 \times 1,0 \times (830,1 - 697,14)}{100 \times 0,00115 \times (2762,7 - 697,14)} = 27,99 \text{ [kg]}$$

Krzysztof Szałucki:

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

$$m_{pMs} = \frac{(100 - 50) \times 1 \times (0,2728 - 0,1408)}{100 \times 0,2728 \times 0,1408} = 1,72 \text{ [kg]}$$

$$m_{pMu} = \frac{\frac{50}{100} \times 1,0 \times (1 - \frac{0,00111}{0,00148}) + 27,99 \times 0,00111}{0,2728} = 0,18 \text{ [kg]}$$

$$m_{pM} = 27,99 + 1,72 - 0,18 = 29,53 \text{ [kg]}$$

Zastosowanie mokrego akumulatora pary o pojemności 1m<sup>3</sup> napełnionego wodą w 50% oraz naładowanego parą nasyconą o ciśnieniu 13barg umożliwia na skutek rozładowania do ciśnienia 6barg wykorzystać 29,53 kg pary. Przyjmując, podobnie jak w przypadku akumulatora suchego, że w systemie obserwowane są wzrosty obciążenia trwające ok. 30 sekund (po których następuje spadek zapotrzebowania poniżej wartości średniej, co umożliwi ponowne ładowanie akumulatora), to 29,53 kg dodatkowo uwolnionej pary 6 barg odpowiada wzrostowi wydajności instalacji o ok. 3544 kg/h przez 30 sekund lub 100 kg/h przez ok. 18 minut. Podsumowując mokry akumulator pary może pomóc w stabilizacji długotrwałych i wysokich wzrostów zapotrzebowania pary.

Bardzo często w obliczeniach zdolności akumulacyjnych akumulatora mokrego pomija się człon związany ze zmianą pojemności wodnej podczas rozładowania  $m_{pMu}$  w takim przypadku ilość pary z procesu akumulacji można wyznaczyć wykorzystując wzór [8] Jest to uzasadniane bardzo małymi ubytkami tej pojemności oraz tym, że pojemność ta wraca do wartości początkowej po procesie ładowania akumulatora za pomocą pary nasyconej.

$$m_{pM} = \frac{V_{zbiornika}}{100} \times \left[ \frac{n \times (h_2' - h_2)}{h_1' \times (h_2 - h_2)} + \frac{(100 - n) \times (\theta_2' - \theta_1)}{\theta_2' \times \theta_1} \right] \text{ [8]}$$

Warto zwrócić tu uwagę, że w przypadku procesu ładowania za pomocą pary przegrzanej wprowadzany jest mniejszy strumień masowy pary przegrzanej niż wyprowadzany strumień masowy pary nasyconej w czasie procesu rozładowania, takie zjawisko będzie skutkowało stopniowym ubywaniem wody w akumulatorze mokrym.

### 3.3. Porównanie akumulatora suchego i mokrego

W przykładach obliczeniowych z poprzednich rozdziałów uzyskano informacje o zdolnościach akumulacyjnych dla akumulatora suchego i mokrego. Dla takich samych parametrów ładowania i rozładowania przy porównaniu akumulacji akumulatora suchego o pojemności 1,0m<sup>3</sup> z akumulacją akumulatora mokrego o tej samej pojemności całkowitej przy 50% wypełnieniu wodą uzyskane zostały następujące możliwości uwolnienia masy pary dodatkowej:

- akumulator suchy  $m_{pS} = 3,44 \text{ kg}$
- akumulator mokry  $m_{pM} = 29,53 \text{ kg}$

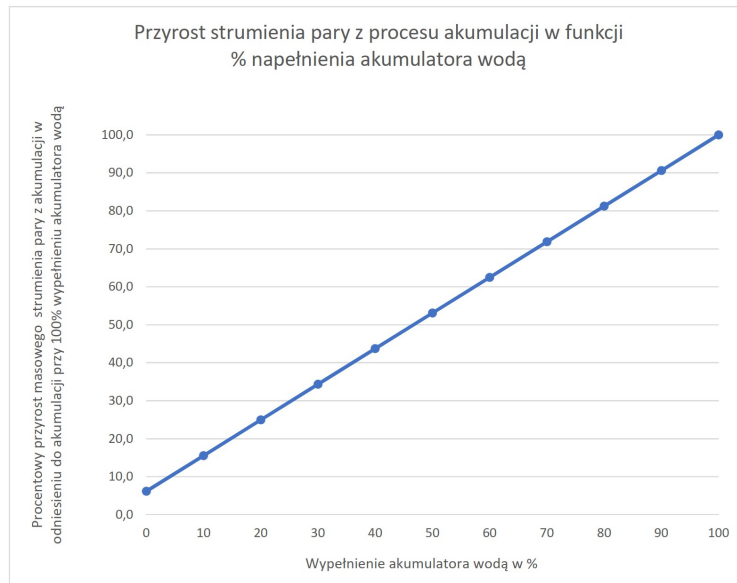
Wyraźnie widać, że zdolności akumulacyjne akumulatora mokrego są wielokrotnie większe niż akumulatora suchego.

Jeżeli dla powyższych przykładów obliczeniowych w przypadku akumulatora mokrego przyjęte zostanie całkowite napełnienie wodą, to podczas rozładowania masa pary wtórnej teoretycznie możliwej do wykorzystania wyniesie 55,63 kg, co oznacza w tym przypadku ponad 16 krotnie większą ilość pary możliwą do wykorzystania z akumulatora mokrego w porównaniu do akumulatora suchego. Oczywiście 100% wypełnienie zbiornika

Krzysztof Szałucki:

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

akumulatora mokrego jest niedopuszczalne, ponieważ w procesie rozładowania dochodziłoby do porywania dużych ilości wody do instalacji parowej.



Rysunek 6. Procentowy przyrost strumienia pary z procesu akumulacji w funkcji napełnienia wodą akumulatora mokrego o parametrach jak w przykładzie obliczeniowym

W przypadku akumulatora mokrego im bardziej napełniony zostanie wodą zbiornik akumulatora tym uzyskiwane będą większe zdolności akumulacyjne – rysunek 6 (wykres obowiązuje tylko dla parametrów obliczeniowych we wcześniejszych przykładach). Niemniej jednak należy pamiętać, że nadmierne napełnienie będzie znacząco pogarszało jakość pary na skutek porywania wody.

Akumulator mokry, dzięki znacząco większym możliwościom akumulacyjnym w tej samej objętości co akumulator suchy, jest powszechnie stosowany w przypadkach instalacji o bardzo silnych wymuszeniach od strony poboru pary. Pojemność akumulatora suchego o takich samych własnościach akumulacji jak w przypadku akumulatora mokrego, musiałaby być przynajmniej kilku jak nie kilkunasto-krotnie większa, co oczywiście oznacza również dużo wyższe koszty inwestycyjne.

#### 4. Metody określenia zapotrzebowania pary wtórnej z procesu akumulacji

Istnieją trzy podstawowe metody określania zmienności obciążeń na instalacji parowej, które można wykorzystać w wstępnym etapie projektowania mokrego akumulatora ciepła. Im lepiej zostaną określone przebiegi zmienności zapotrzebowania pary wtórnej z akumulacji oraz możliwości w zakresie ładowania tym dokładniej można określić wymaganą pojemność wodną akumulatora. Dzięki temu zapewniona będzie optymalizacja kosztów budowy (ze względu na wielkość) oraz gwarancja zapewnienia właściwych parametrów roboczych.

##### 4.1. Na podstawie doświadczenia

Metoda ta jest najbardziej zawodna. Nie bazuje ona na pomiarach zmienności obciążeń, a jedynie na wycuciu użytkownika lub projektanta, który szacuje wielkości średnich obciążeń oraz ich pików najlepiej z analizą ich przebiegów czasowych. Niestety wycucie czasami może zawodzić. Skrajnym przykładem błędów popełnianych na skutek takiego podejścia, był zakup w ciemno przez użytkownika akumulatora o pojemności 100m<sup>3</sup>.

*Krzysztof Szałucki:*

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

Okazało się, że wydajność wytwornicy pary, która miała zasilać ten akumulator była tak niska, że wygrzewanie ze stanu zimnego napełnionego do połowy akumulatora trwałoby aż ponad 17 godzin! Po analizie okazało się, że faktyczne zapotrzebowanie na pojemność wodną akumulatora dla zapewnienia odpowiednich przepływów pary wtórnej nie przekraczało 3m<sup>3</sup>. Oczywiście w oparciu o tę metodę można równie łatwo popełnić błąd niedoszacowania wielkości.

Należy zwrócić uwagę, że tę metodę będziemy stosować jeżeli projektujemy nową kotłownię i od razu przewidujemy konieczność zastosowania akumulatora. W takim przypadku można wykorzystać przebiegi zmienności obciążeń na podobnym zakładzie, ale niestety w tych warunkach to doświadczenie projektanta odgrywa podstawową rolę.

## **4.2. Na bazie analizy przebiegów obciążeń w wybranych okresach**

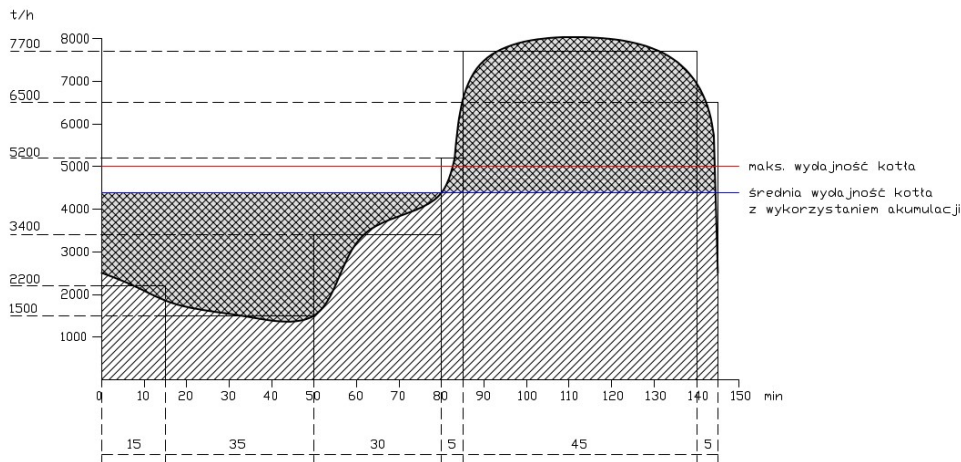
Metoda polega na wykorzystaniu informacji o przebiegach zmian przepływów pary z miernika przepływu podczas typowych procesów zachodzących w instalacji parowej – głównie w warunkach szczytowych. Zbieramy dane przepływowe z miernika w formie wykresnej lub liczbowej i prowadzimy analizę zmienności, tak aby określić średnią wartość obciążeń od strony poboru pary i dopasować do niej czasowe przebiegi pików odchylenia przepływu pary. Wartość średnią staramy się określić na takim poziomie, aby w pełnych przebiegach czasowych akumulator zapewnił odpowiednie ilości pary uwalnianej dodatkowo, ale równocześnie aby były uwzględnione i wymagane czasy ładowania akumulatora z żądaną wydajnością. Metoda wymaga czasu poświęconego na zbieranie danych i ich analizę, jak również doświadczenia i niestety możliwe jest nietrafne określenie warunków szczytowych.

## **4.3. Na bazie automatycznej analizy przebiegów w czasie obciążeń szczytowych i pozaszczytowych**

W metodzie tej nadaj wykorzystujemy informacje z przepływomierza pary. Podstawową różnicą w stosunku do poprzedniej metody jest to, że tak programujemy komputer miernika przepływu, aby zliczając nam przepływy w różnych warunkach i przebiegach czasowych cały czas określał średnie obciążenie i czasowe przebiegi odchylenia od średniej. Dzięki odpowiedniemu programowi komputer pomiarowy będzie w trybie rzeczywistym zliczał odcinki czasowe, w których występują zwiększone zapotrzebowania pary oraz te w których zapotrzebowanie jest niższe od średniego (zapewnienie procesu ładowania akumulatora). Popęlnienie poważnego błędu w szacunkach zmienności obciążeń jest przy tym rozwiązaniu bardzo niskie.

## **5. Wyznaczenie wymaganej pojemności akumulatora mokrego**

Pierwszym krokiem w procesie wyznaczenia wymaganej pojemności akumulatora jest określenie zapotrzebowania na parę wtórną z akumulacji jedną z metod opisanych w rozdziale 4. Przyjmując metodę określoną w 4.2, w oparciu o wykresy przepływu pary z przepływomierza, wybieramy charakterystyczne przedziały przebiegu zmian wymuszeń od strony poboru pary w czasie – rysunek 7. Warto zwrócić uwagę, że w przypadku zastosowania akumulatora ciepła można zapewnić stabilną pracę nawet w przypadku przekroczenia maksymalnej wydajności kotła w pik, to również pokazano na rysunku 7.



Rysunek 7. Wybrany do analizy przedział przebiegu zmian wymuszeń od strony poboru pary w czasie

Kolejnym krokiem jest uśrednienie wartości w przyjętych przedziałach czasowych przy założeniu, aby możliwie najdokładniej odpowiadały one przebiegom rzeczywistym. Następnie trzeba określić, które przedziały czasowe obciążenia można uznać za okresy ładowania, a które rozładowania akumulatora mokrego. Wstępnie można przyjąć pewną stałą wartość obciążenia (np. maksymalną wydajność kotła lub wydajność, której nie powinno się przekraczać), a następnie uśrednione wartości wymuszeń poniżej średniej przyjąć jako należące do okresu ładowania akumulatora, a wartości wymuszeń powyżej średniej przyjąć jako należące do okresu rozładowania akumulatora. Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie średnich obciążeń dla okresów ładowania i rozładowania akumulatora, a także obciążenia średniego dla całego rozpatrywanego okresu.

$$\text{obciążenie średnie podczas ładowania} = \frac{2200 \times 15 + 1500 \times 35 + 3400 \times 20}{80} = 2344 \text{ kg/h}$$

$$\text{obciążenie średnie podczas rozładowania} = \frac{5200 \times 5 + 7700 \times 45 + 6500 \times 5}{55} = 7364 \text{ kg/h}$$

$$\text{obciążenie średnie całego okresu} = \frac{2344 \times 80 + 7364 \times 55}{80 + 55} = 4389 \text{ kg/h}$$

Przyjmując, że kocioł parowy będzie pracował z wydajnością równą obciążeniu średniemu podczas całego rozpatrywanego okresu możemy wyznaczyć uśrednione piki rozładowania (przeciążenia) i ładowania.

$$\text{średni pik ładowania} = 4389 - 2344 = 2045 \text{ kg/h}$$

$$\text{średni pik rozładowania (przeciążenia)} = 7364 - 4389 = 2975 \text{ kg/h}$$

Dzięki uzyskanej wartości średniej piku rozładowania (przeciążenia) można wyznaczyć masę pary, która musi być uwolniona w procesie rozładowania akumulatora  $m_{pM}$ .

$$m_{pM} = \frac{2975 \times 45}{60} = 2231 \text{ [kg]}$$

Następnym krokiem jest określenie procentowej wartości napełnienia zbiornika akumulatora mokrego wodą. Zazwyczaj nie są to wielkości większe niż 90%, często z zakresu 70-80%, ale zdążają się również 50% napełnienia. Wyznaczając procent wypełnienia należy pamiętać:

Krzysztof Szałucki:

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

- wyższy poziom to lepsze zdolności akumulacyjne, ale również większe ryzyko uzyskiwania mokrej pary,
- szczególnie szybkich i dużych wymuszeniach w akumulatorze wystąpi znaczące podniesienie poziomu wody (duża ilość pęcherzy pary z rozprężenia w pojemności wodnej), co może prowadzić do porywania wody,
- prędkość odparowania z powierzchni lustra wody podczas pików przeciążenia powinna być niższa niż 0,2 m/s (prędkość tę można kształtować optymalizując wymiary zbiornika bez zmian jego pojemności),
- im wyższa prędkość odparowania z powierzchni tym należy stosować dłuższą potencjalną drogę kropeł wody do wylotu pary,
- w uzasadnionych przypadkach warto zastosować systemy osuszające parę z akumulacji

Przyjmując wartość procentową napełnienia zbiornika wodą (w poniższym przykładzie przyjęto  $n=70\%$ ), można w oparciu o wzory [9] lub [10] (przekształcone odpowiednio wzory [7] i [8]) bez problemu wyznaczyć całkowitą pojemność zbiornika akumulatora mokrego oraz jego wymaganą pojemność wodną.

$$V_{zbiornika} = \frac{100 \times m_{pM}}{\frac{n \times (h_1' - h_2')}{\vartheta_1' \times (h_2' - h_2')} \times \left(1 - \frac{\vartheta_2'}{\vartheta_2}\right) + \frac{(100-n) \times (\vartheta_2' - \vartheta_1')}{\vartheta_2' \times \vartheta_1'} - \frac{n}{\vartheta_2'} \times \left(1 - \frac{\vartheta_2'}{\vartheta_1'}\right)} \quad [9]$$

$$V_{zbiornika} = \frac{100 \times m_{pM}}{\frac{n \times (h_1' - h_2')}{\vartheta_1' \times (h_2' - h_2')} + \frac{(100-n) \times (\vartheta_2' - \vartheta_1')}{\vartheta_2' \times \vartheta_1'}} \quad [10]$$

Po podstawieniu do wzorów [9] i [10] wcześniej wykorzystywanych danych uzyskamy następujące wyniki:

$$V_{zbiornika} = \frac{100 \times 2231}{\frac{70 \times (880,18 - 697,14)}{0,00115 \times (2762,7 - 697,14)} \times \left(1 - \frac{0,00111}{0,2728}\right) + \frac{(100-70) \times (0,2728 - 0,1408)}{0,2728 \times 0,1408} - \frac{70}{0,2728} \times \left(1 - \frac{0,00111}{0,00115}\right)} = 55,8 \text{ m}^3$$

$$V_{zbiornika} = \frac{100 \times 2231}{\frac{70 \times (880,18 - 697,14)}{0,00115 \times (2762,7 - 697,14)} + \frac{(100-70) \times (0,2728 - 0,1408)}{0,2728 \times 0,1408}} = 55,5 \text{ m}^3$$

Jak widać z obliczeń różnica w wymaganej pojemności jest stosunkowo niewielka, a przy oczywistym przyjęciu współczynników bezpieczeństwa, całkowicie akceptowalne jest przeprowadzenie obliczeń w oparciu o wzór uproszczony [10]. Wymaganą wielkość pojemności wodnej wyznacza się w oparciu o wzór [11].

$$V_{poj.wodnej} = \frac{n \times V_{zbiornika}}{100} \quad [11]$$

$$V_{poj.wodnej} = \frac{70 \times 55,5}{100} = 38,85 \text{ m}^3$$

W ten sposób wyznaczona została wymagana pojemność zbiornika i pojemność wodna dla zapewnienia wymaganej podaży pary z procesu akumulacji. Można przejść do projektowania zbiornika. Po tym procesie zalecane jest wykonanie obliczeń korekcyjnych

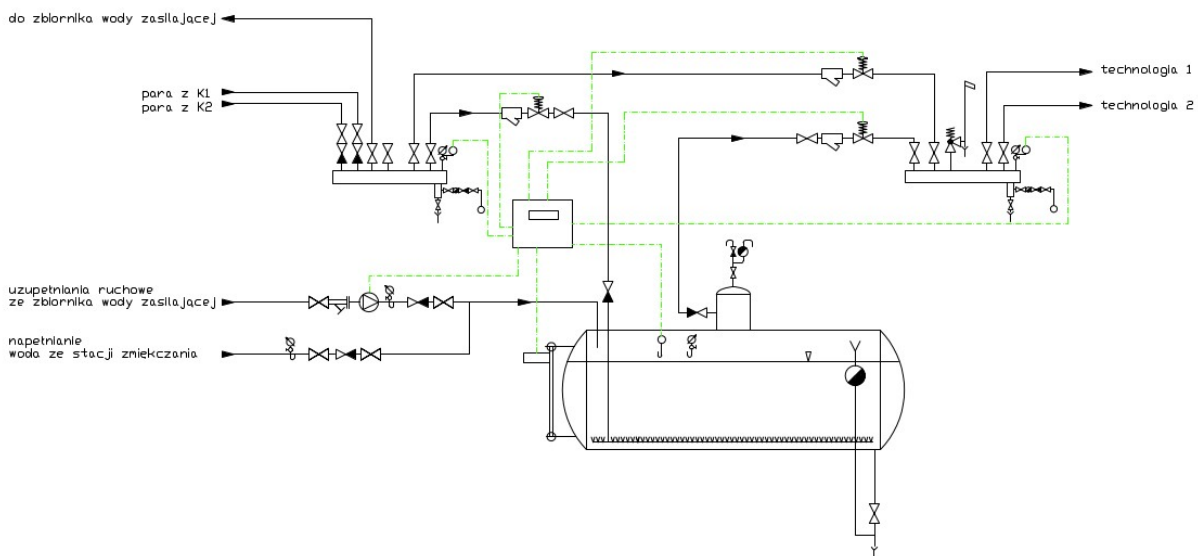
Krzysztof Szałucki:

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

dla uzyskania rzeczywistych informacji o zdolnościach akumulacyjnych w oparciu o wzory [8] lub [9].

## 6. Zabudowa akumulatora mokrego w systemie parowym

Właściwy dobór pojemności zbiornika akumulatora mokrego jest bardzo ważny, ale nie wystarczający dla zapewnienia poprawnej pracy akumulatora w systemie parowym. Ważnym aspektem jest poprawny dobór osprzętu: zaworów regulacyjnych, armatury odcinającej i zwrotnej, filtrów, odwodnień, zaworów bezpieczeństwa, pompy uzupełniającej oraz osprzętu pomiarowo-regulacyjnego. Przygotowanie schematu zabudowy systemu akumulatora mokrego w instalacji parowej – przykład na rysunku 8 - w oparciu, o który będzie wykonana zabudowa urządzeń na obiekcie jest jedną z podstawowych czynności przygotowania projektu.



Rysunek 8. Przykład schematu zabudowy akumulatora mokrego w instalacji parowej

Podczas projektowania systemu akumulatora mokrego należy szczególną uwagę zwrócić na następujące składowe:

- zespół ładowania akumulatora parą: zawór regulacyjny, armatura odcinająca i zwrotna, filtr, czujnik ciśnienia – dobór pod kątem zapewnienia poprawności procesu ładowania,
- zespół rozładowania akumulatora: zawór regulacyjny, armatura odcinająca i zwrotna, filtr, czujnik ciśnienia – dobór pod kątem zapewnienia wymaganego strumienia pary z procesu akumulacji lub strumienia całkowitego,
- zespół głównej redukcji ciśnienia pary dla procesów o niskiej zmienności obciążeń,
- zespół uzupełniania (w przypadku zasilania parą przegrzaną) ubytków wody i napełniania akumulatora: pompa uzupełniająca i armatura przy pompowa oraz sonda pomiaru poziomu należy czas napełniania i uzupełniania
- przelew: najczęściej odwadniacz pływakowy zabudowany na poziomie maksymalnego napełnienia zbiornika, – w przypadku zasilania parą mokrą konieczne jest zapewnienie odprowadzenia wody wprowadzanej w strumieniu pary mokrej, w przypadku zasilania parą przegrzaną konieczne jest zapewnienie awaryjnego zrzut strumienia wody z procesu uzupełniania,
- układ odpowietrzająco-napowietrzający: odpowietrznik termiczny i łamacz próżni (jeżeli zbiornik nie był projektowany na parametry próżni),

Krzysztof Szałucki:

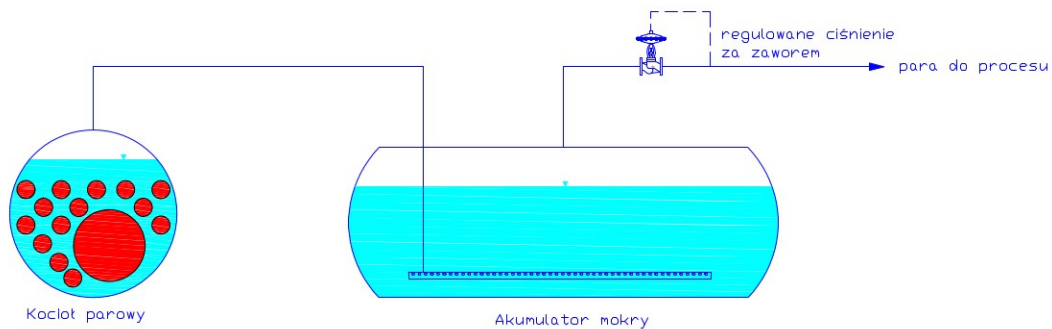
„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

- zawór bezpieczeństwa: jeżeli zbiornik został zaprojektowany dla parametru dopuszczalnego ciśnienia roboczego źródła pary to nie ma konieczności zabudowy zaworu bezpieczeństwa, jeżeli zbiornik został zaprojektowany na ciśnienie niższe, to konieczne jest zastosowanie odpowiednio dobranego zaworu bezpieczeństwa na zbiorniku akumulatora,
- szafa sterownicza: poprawny algorytm sterowania procesem.

Projektowanie i składowe systemu w dużej mierze będą zależne od określenia oczekiwań stawianych systemowi akumulacji – następane punkty pokazują kilka najczęściej stosowanych sposobów zabudowy akumulatora mokrego w systemie parowym.

## 6.1. Pełna wydajność pary produkowanej w kotle przepływa przez akumulator, układ bez zapewnienia stabilizacji ciśnienia w kotle

Rozwiązanie to – rysunek 9 - stosowane jest bardzo często w zakładach produkcji styropianu, gdzie występuje bardzo gwałtowny wzrost poboru pary w krótkim czasie napełniania formy, a następnie obciążenie spada do bardzo niskiej wartości. Układ zazwyczaj jest tak projektowany, aby spadek ciśnienia podczas piku obciążenia nie przekraczał wartości 1 bar lub innej, określonej jako bezpieczny spadek ciśnienia dla kotła. Stosunkowo niski dopuszczalny spadek ciśnienia ogranicza możliwości wykorzystania pary z procesu akumulacji. W tym rozwiązaniu całość pary przepływa przez akumulator.



Rysunek 9. Zabudowa akumulatora w systemie parowym: pełen przepływ pary przez akumulator, układ bez zabezpieczenia stabilizacji ciśnienia w kotle

Zalety: prosta konstrukcja systemu, zazwyczaj niższy koszt inwestycyjny

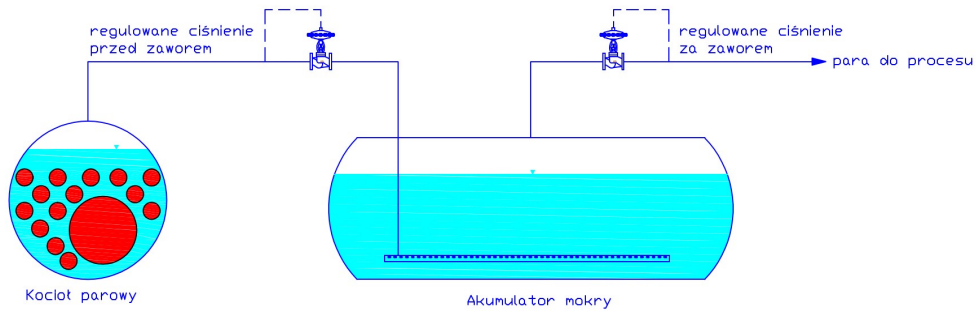
Wady: duże ilości pary przepływają przez akumulator, brak ochrony kotła przed przeciążeniem, niewielkie wykorzystanie procesu akumulacji

## 6.2. Pełna wydajność pary produkowanej w kotle przepływa przez akumulator, układ z zapewnieniem stabilizacji ciśnienia w kotle

Zapewnienie stabilizacji ciśnienia w kotle uzyskiwane poprzez zabudowę dodatkowego zaworu regulującego stałe ciśnienie pary przed zaworem – rysunek 10 – umożliwia większe zróżnicowanie ciśnień naładowania i rozładowania akumulatora mokrego, dzięki czemu uzyskiwane są znacznie większe ilości pary wtórnej do wykorzystania podczas pików obciążeń. Dzięki stabilizacji procesu obciążenia kotła nie dochodzi do niekorzystnych zjawisk związanych z jego przeciążeniem. Ponieważ całość pary przepływa przez akumulator armatura i rurociągi zarówno po stronie ładowania jak i rozładowania są zazwyczaj o dużych średnicach, co podnosi koszt wykonania. Para podczas stabilnych obciążeń również musi przepływać przez objętość wodną akumulatora.

Krzysztof Szałucki:

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”



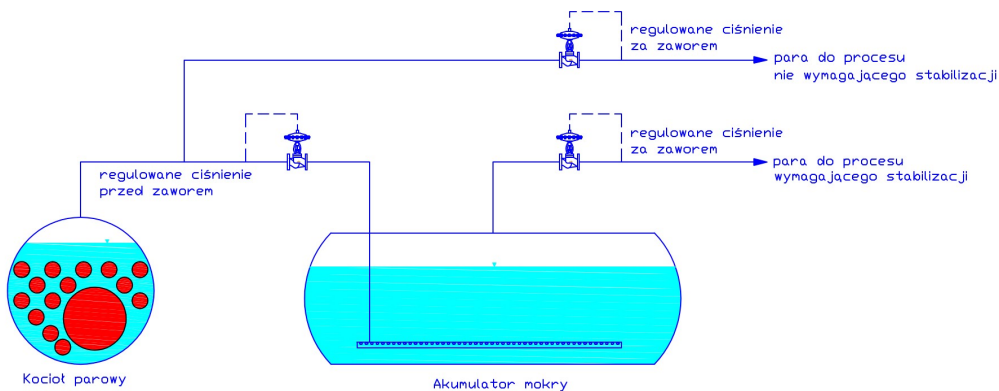
Rysunek 10. Zabudowa akumulatora w systemie parowym: pełen przepływ pary przez akumulator, układ z zabezpieczeniem stabilizacji ciśnienia w kotle

Zalety: zabezpieczenie kotła przed przeciążeniem, wysokie wykorzystanie procesu akumulacji

Wady: duże ilości pary przepływają przez akumulator, zazwyczaj nieco wyższy koszt inwestycyjny

### 6.3. Akumulator stabilizuje pracę układu odpowiedzialnego za szybkie zmiany obciążeń od strony poboru pary, pozostałe instalacje zasilane są bezpośrednio z kotła i nie wymagają stabilizacji

Jeżeli w systemie parowym można wyodrębnić i osobno zasilić odbiorniki charakteryzujące się małą zmiennością obciążeń – rysunek 11 – można je zasilić parą bezpośrednio z kotła z pominięciem akumulatora. Takie rozwiązanie powoduje obniżenie kosztu systemu akumulacji. Jednak należy pamiętać, że np. podłączenie do tej linii dodatkowego odbiornika powodującego duże i szybkie wymuszenia od strony poboru pary może powodować negatywne oddziaływanie na kocioł i nie stabilizowany układ parowy.



Rysunek 11. Zabudowa akumulatora w systemie parowym: częściowy przepływ pary przez akumulator, układ z zabezpieczeniem stabilizacji ciśnienia w kotle od strony wybranej części instalacji

Zalety: zabezpieczenie kotła przed przeciążeniem, wysokie wykorzystanie procesu akumulacji, zazwyczaj nieco niższy koszt inwestycyjny, mniej pary przepływa przez akumulator

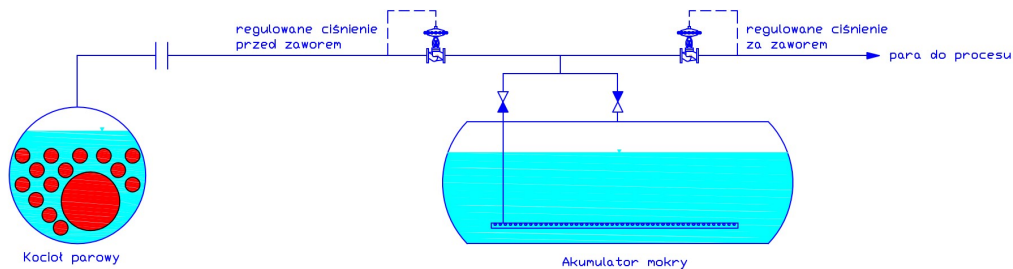
Wady: ryzyko przeciążeń przy złym oszacowaniu zmienności obciążeń w niestabilizowanej części instalacji

Krzysztof Szałucki:

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

## 6.4. Zabudowa akumulatora z częściowym przepływem stosowana często w przypadku umiejscowienia akumulator w pewnej odległości od kotła parowego

System – rysunek 12 - stosowany zazwyczaj w przypadku konieczności zastosowania procesów akumulacji w pobliżu wytypowanych odbiorów i z dala od źródła pary. Konstrukcja często oparta na zaworach bezpośredniego działania. Para podczas stabilnych obciążeń przepływa z pominięciem akumulatora. Konieczna wysoka dbałość o poprawną pracę zaworów zwrotnych.



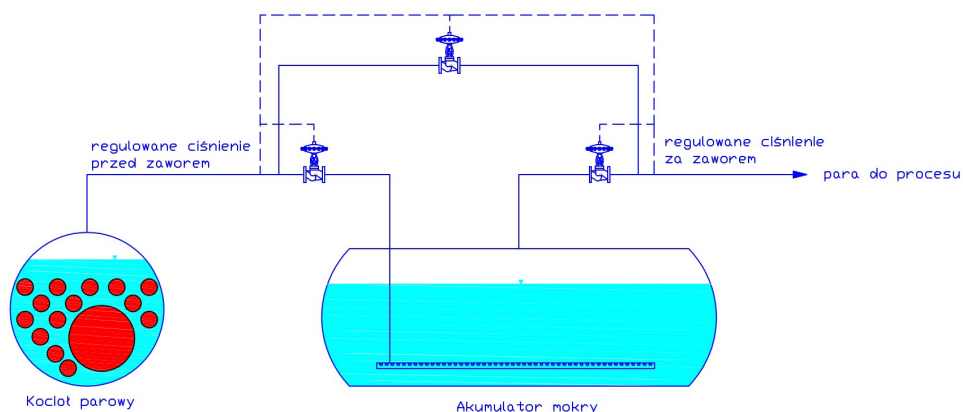
Rysunek 12. Zabudowa akumulatora w systemie parowym: częściowy przepływ pary przez akumulator oddalony od źródła pary, układ z zabezpieczeniem stabilizacji ciśnienia w instalacji ładującej

Zalety: zabezpieczenie rozległej instalacji przed zmianami ciśnienia, wysokie wykorzystanie procesu akumulacji, prosta konstrukcja, zazwyczaj nieco niższy koszt inwestycyjny

Wady: wyższe ryzyko awarii zaworów bezpośredniego działania, ze względu na oddalenie od źródła i oddziaływanie instalacji możliwe niższe parametry ładowania

## 6.5. Akumulator z częściowym przepływem zabudowany na obejściu zaworu redukcji ciśnienia pary

Jeden z najczęściej stosowanych systemów zabudowy akumulatora mokrego – rysunek 13 – zapewnia całkowite zabezpieczenie przed przeciążeniem od strony źródła, a jednocześnie najwyższą stabilizację parametrów pary do technologii.



Rysunek 13. Zabudowa akumulatora w systemie parowym: częściowy przepływ pary przez akumulator na obejściu zaworu redukcji ciśnienia pary, układ z zabezpieczeniem stabilizacji ciśnienia w instalacji ładującej

Krzysztof Szałucki:

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”

Para podczas stabilnych obciążeń przepływa z pominięciem akumulatora dzięki czemu nie są wprowadzane opóźnienia w procesie regulacji oraz nie jest obserwowane podniesienie poziomu wody w zbiorniku na skutek przepływu strumienia pary przez akumulator. Zalecane stosowanie systemu sterowania w pełni zautomatyzowanego z możliwością optymalizacji nastaw.

Zalety: zabezpieczenie przeciążeniem, wysokie wykorzystanie procesu akumulacji, umożliwia prowadzenie optymalizacji procesu, najkorzystniejsza stabilizacja ciśnienia pary do technologii

Wady: wyższy koszt inwestycyjny

## 7. Zalety wynikające z zastosowania akumulatora

Zastosowanie akumulatora mokrego w przypadku występowania szybkich zmian wymuszeń od strony poboru pary wiąże się z uzyskaniem następujących efektów (zalety):

- stabilizuje ciśnienie pary podawanej do technologii podczas gwałtownych zmianach wymuszeń od strony poboru pary,
- zapewnia pracę kotła ze stabilnym obciążeniem w długich okresach oraz spowalnia zmienność obciążeń przy gwałtownych zmianach wymuszeń od strony poboru pary,
- dobrze dobrany, skonstruowany i eksploatowany akumulator mokry gwarantuje ochronę kotła przed przeciążeniem,
- dzięki zapewnieniu małych prędkości odparowania z lustra wody w akumulatorze mokrym zapewnia wytwarzanie suchej pary,
- ze względu na niski poziom zasolenia wody w akumulatorze obniża się poziom zanieczyszczeń w parze,
- istnieje możliwość uzyskiwania pary nasyconej przy zasilaniu akumulatora parą przegrzaną, należy tu jednak zwrócić uwagę, że konstrukcja takiego akumulatora mokrego powinna być inna niż standardowego.

Decydując się na zabudowę akumulatora mokrego użytkownik rozważa przede wszystkim pierwsze trzy punkty, ale należy pamiętać, że pozostałe również pozytywnie oddziałują na instalację pary.

## 8. Podsumowanie

W przypadku występowania dużej zmienności wymuszeń poboru pary zabudowa akumulatora mokrego powinna być poważnie rozważanym rozwiązaniem. Decyzja o zabudowie musi być poprzedzona odpowiednią analizą pracy systemu pod kątem szybkości i zmian wymuszeń od strony poboru pary. Ze względu na wysoki koszt inwestycyjny akumulatora mokrego w pierwszym kroku należy przeanalizować możliwość zastosowania opisanych tańszych rozwiązań pod kątem spełnienia oczekiwanych efektów. Jeżeli analiza wykaże, że mokry akumulator to właściwe i konieczne rozwiązanie, wówczas należy przeprowadzić odpowiednie obliczenia oraz rozważyć optymalny sposób zabudowy akumulatora na instalacji. Poprawnie dobrany, optymalnie skonfigurowany i dobrze eksploatowany na instalacji parowej to zabezpieczenie kotłów parowych, przy równoczesnej gwarantowanej stabilizacji ciśnienia pary dla procesów technologicznych.

Wiele innych 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)*

*Krzysztof Szalucki:*

„Możliwości wykorzystania systemów akumulacji ciepła podczas szybkich zmian obciążenia kotła parowego od strony poboru pary.”