

Krzysztof Szatucki

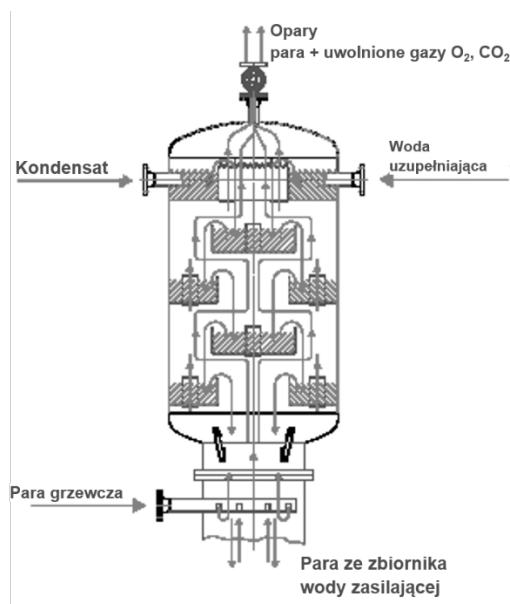
Metodyka obliczeń opłacalności zastosowania systemu odzysku ciepła oparów odprowadzanych z procesu odgazowania termicznego wody zasilającej kotły parowe

1. Wstęp

Często jednym z irytujących objawów typowych dla pracującej kotłowni parowej jest mniej lub bardziej intensywny obłok kondensującej pary na dachu kotłowni. Jest on związany z koniecznością prowadzenia wydmuchu oparów (para + gazy uwolnione z odgazowywanej wody) z procesu odgazowania termicznego wody zasilającej kotły parowe. W związku z tym pojawia się szereg pytań. Czy wydmuch oparów jest konieczny? Czy jest to nieuzasadniona strata ciepła? Czy można to ciepło wykorzystać? I wreszcie chyba to najistotniejsze: w jaki sposób określić, czy odzysk ciepła z oparów odprowadzanych z procesu odgazowania termicznego jest opłacalny? W dalszej części artykułu poruszone zostały zagadnienia wstępnie zdefiniowane w powyższych pytaniach w taki sposób, aby docelowo możliwa była stosunkowo prosta analiza możliwości i opłacalności wykorzystania strumienia ciepła oparów odprowadzanych z procesu odgazowywania termicznego wody zasilającej kotły parowe.

2. Czy odprowadzenie oparów z kolumny odgazowawcza jest konieczne?

Warunkiem koniecznym poprawnego procesu odgazowania wody jest zapewnienie, że czynnik grzewczy, przepływający i mieszający, jakim w procesie odgazowania termicznego jest para nie zawiera w swoim składzie gazów, które z wody chcemy usuwać. Trzeba pamiętać, że w miarę usuwania z wody gazów w niej rozpuszczonych do pary, zwiększa się udział tych gazów w parze. Im większa jest zawartość usuwanych z wody gazów w parze tym gorsza jakość odgazowania. Żeby nie dopuścić do nadmiernego nagromadzenia się gazów w parze musimy je odprowadzać możliwie z największą skutecznością – rysunek 1.



Rysunek 1. Przepływy wody, kondensatu, pary grzewczej i oparów podczas procesu odgazowania termicznego w kolumnie odgazowawczej

Odprowadzenie uwolnionych w procesie odgazowania gazów wcale nie jest łatwe. Często można spotkać się z **mylnym** stwierdzeniem, że gazy w parze zachowują się jak w wodzie

i siłą wynikającą z różnicy gęstości gromadzą się na górze, gdzie łatwo je można odprowadzić. Faktycznie cząsteczki gazów i pary poruszają się z dużymi prędkościami i zderzając się chaotycznie ze sobą dążą do równomiernego wymieszania w zajmowanej objętości kolumny. Żeby odprowadzić gazy uwolnione w procesie odgazowania termicznego konieczne jest wywołanie ruchu mieszaniny ku górze kolumny odgazowywacza. Dzięki temu, że na górnych półkach kolumny odgazowywacza temperatura wody odgazowywanej jest niższa, dochodzi tam do bardziej intensywnej kondensacji pary w mieszaninie, co z kolei powoduje wzrost zawartości uwolnionych gazów. Jednakże udział pary w mieszaninie w górnej części kolumny odgazowywacza jest w dalszym ciągu wysoki. Ruch mieszaniny gazów i pary ku górze kolumny spowodowany tylko kondensacją pary (szczególnie przy wysokiej temperaturze wody podawanej do procesu) jest niewystarczający, ponieważ nie spowoduje wyprowadzenia gazów z kolumny. W tym celu dla zapewnienia wymaganej jakości procesu odgazowania termicznego stosuje się układy wydmuchu oparów (para + gazy uwolnione z wody). Układ wydmuchu jest dobierany w taki sposób, aby zapewnił nawet przy braku kondensacji minimalną wymaganą prędkość wznoszenia się mieszaniny pary i gazów w kolumnie oraz zagwarantował usuwanie gazów ze wymaganą przez proces skutecznością. Dzięki temu maksymalizowana jest sprawność pracy układu odgazowania termicznego pod kątem usuwania gazów rozpuszczonych w wodzie.

Układ wydmuchu oparów musi w sposób ciągły odprowadzać określony strumień mieszaniny pary i uwolnionych gazów z intensywnością zapewniającą właściwe odgazowywanie wody zasilającej przy maksymalnej wydajności roboczej kotłowni. Zalecana jest optymalizacja stopnia otwarcia zaworu wydmuchu oparów z odgazowywacza termicznego przeprowadzona w taki sposób, aby określona została nastawa właściwa dla wymaganego poziomu odgazowania wody zasilającej kotły parowe przy stosunkowo jak najmniejszym wydmuchu oparów. Procedura taka wymaga zastosowania systemu ciągłego pomiaru zawartości tlenu rozpuszczonego w wodzie odgazowanej (pomiar najsilniej korozyjnego gazu rozpuszczonego w wodzie), a ponieważ procesy w układzie odgazowania termicznego zachodzą powolnie, konieczne jest zapewnienia odpowiednio długiego czasu optymalizacji.

NIEDOPUSZCZALNE jest zamykanie zaworu wydmuchu oparów z procesu odgazowywania. Niewskazana jest również zabudowa na rurze wydmuchowej automatycznego zaworu odpowietrznika termicznego, ponieważ nie zapewnia on ciągłego ruchu mieszaniny wewnątrz kolumny i otwiera się przy dużych zawartościach gazów w parze, które w czasie zamknięcia zaworu muszą zaistnieć praktycznie w całej objętości kolumny, co powoduje fatalne warunki dla procesu odgazowania (nie jest spełniony warunek konieczny procesu odgazowania).

Odprowadzenie oparów z kolumny odgazowywacza termicznego JEST KONIECZNE!

3. Wyznaczenie wielkości strumienia oparów

Jak wspomniano w poprzednim rozdziale wielkość strumienia oparów odprowadzanych z procesu odgazowania termicznego powinna być doregulowana w oparciu o pomiary zawartości tlenu w wodzie odgazowanej, ale w jaki sposób oszacować wielkość tego strumienia odprowadzanych oparów dla potrzeb obliczeń ciepła traconego w wydmuchu oparów?

Ponieważ udział pary w wydmuchiowanych oparach z procesu odgazowania jest wiodący, w dalszej części opracowania dla uproszczenia procedur obliczeniowych przyjęto, że własności oparów odpowiadają własnościom pary o danych parametrach.

3.1 W oparciu o wydajność kotłów

Przybliżoną, ale jednocześnie chyba najbardziej uniwersalną metodą obliczenia wielkości strumienia odprowadzanych oparów jest szacowanie strumienia w oparciu o maksymalną roboczą wydajność kotłowni parowej. Metoda ta oparta jest na oszacowaniu teoretycznej wielkości kolumny odgazowywacza termicznego dla zapewnienia odgazowania określonego maksymalnego strumienia wody zasilającej w oparciu o wzór (1), a następnie szacowaniu wielkości masowego strumienia oparów w oparciu o teoretyczną średnicę kolumny odgazowywacza i przyjętą prędkość przemieszczania się oparów w górę kolumny odgazowywacza termicznego- w oparciu o wzór (2).

Teoretyczną średnicę kolumny d_{kolumny} [mm] można wyznaczyć według wzoru:

$$d_{\text{kolumny}} = 145,7 \times \sqrt{\frac{V_{\text{odg}}}{w_{\text{odg}}}} \quad (1)$$

gdzie:

V_{odg} [m³/h] strumień objętościowy odgazowywanej wody zasilającej
 w_{odg} [m/min] prędkość opadania wody w przekroju kolumny odgazowania termicznego, zalecana 0,4...0,6 m/min

Oszacowanie masowego strumienia oparów $m_{\text{oparów}}$ [kg/h]:

$$m_{\text{oparów}} = \frac{\pi \times d_{\text{kolumny}}^2 \times w_{\text{oparów}}}{4 \times \delta_{\text{oparów}}} \times \frac{3600}{1000^3} \quad (2)$$

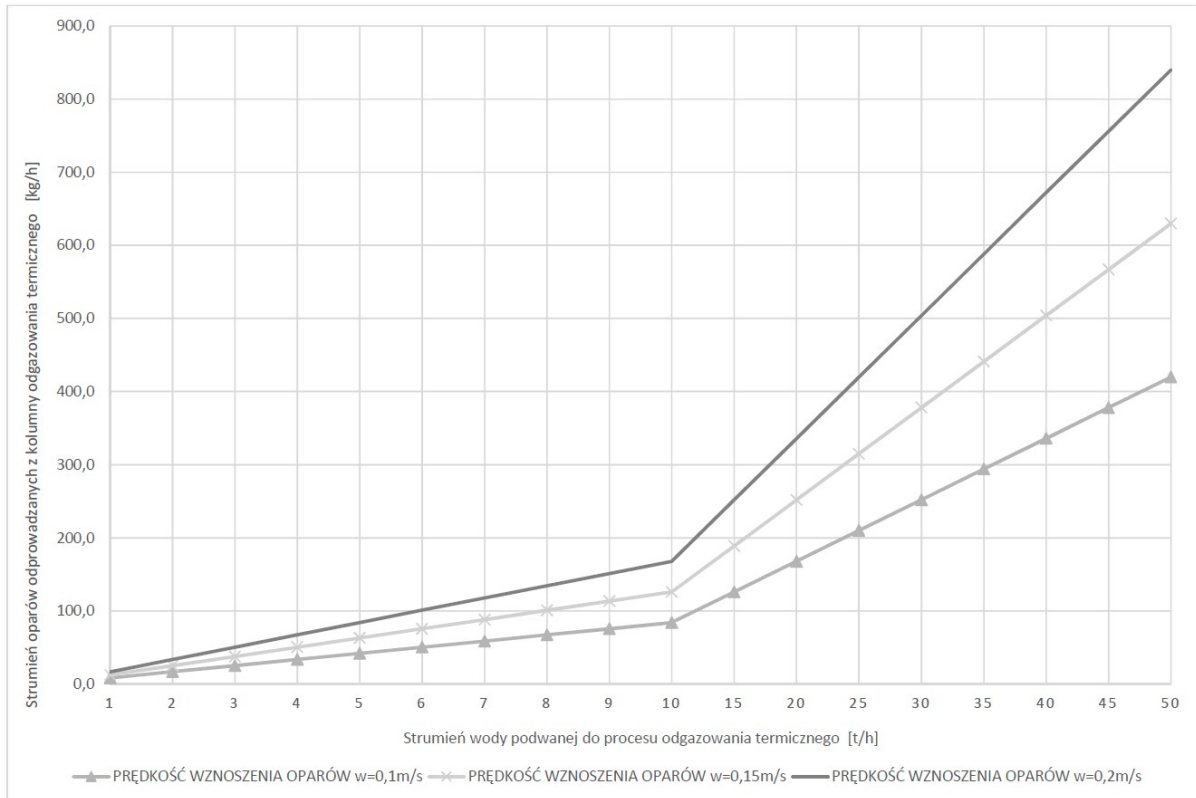
gdzie:

$v_{\text{oparów}}$ [m³/kg] objętość właściwa oparów (wg. przyjętego uproszczenia: pary) przy parametrach roboczych w kolumnie odgazowywacza termicznego
 $w_{\text{oparów}}$ [m/s] prędkość wznosząca oparów w kolumnie odgazowywacza termicznego, zalecane 0,1...0,2 m/s (większe wartości dla mniejszych przepływów)

W oparciu o powyższe wzory można dokonać obliczeń masowego strumienia oparów odprowadzanych z systemu odgazowywacza termicznego dla konkretnej wydajności systemu odgazowania termicznego na potrzeby kotłowni parowej. Można też przeprowadzić obliczenia dla różnych wydajności maksymalnych kotłowni, które pozwalają na przedstawienie graficzne wyników wymaganego strumienia odprowadzanych z kolumny odgazowywacza termicznego w funkcji maksymalnej wydajności kotłowni parowej (lub maksymalnego strumienia wody zasilającej) – wyniki takich obliczeń przedstawione zostały na rysunku 2 dla trzech różnych wartości prędkości wznoszących oparów w kolumnie odgazowywacza.

Dla szacowania wartości strumienia wydmuchu oparów zaleca się przyjmowanie większych wartości prędkości wznoszenia $w_{\text{oparów}}$ dla mniejszych wydajności maksymalnych kotłowni parowej, a mniejszych prędkości wznoszenia z podanego powyżej zakresu dla większych wydajności kotłowni.

Określenie masowego strumienia oparów z kolumny odgazowywacza tą metodą jest niedoskonałe, ale przybliżenie często jest wystarczające. Zazwyczaj dzięki tej metodzie uzyskiwane są informacje o największej wartości strumienia wydmuchu oparów dla danej wydajności kotłowni.



Rysunek 2. Wymagany strumień oparów odprowadzanych z kolumny odgazowawcza termicznego zależnie od maksymalnego strumienia wody podawanej do procesu odgazowania i prędkości wznoszenia oparów w kolumnie

3.2 W oparciu o wielkość i nastawę zaworu wydmuchu oparów

W większości stosowanych rozwiązań do regulacji strumienia wydmuchu oparów z procesu odgazowania termicznego wykorzystywane są zawory odcinające z grzybem regulacyjnym. Zawór taki umożliwia dość precyzyjne doregulowanie wymaganego przez proces odgazowania termicznego strumienia odprowadzanych oparów. Należy zwracać uwagę, aby stosowane do tego celu zawory charakteryzowały się grzybem profilowanym zapewniającym charakterystykę liniową regulacji w całym zakresie skoku zaworu. Popularne zawory odcinające-regulacyjne, których profil regulacyjny obejmuje jedynie niewielką część grzyba nie powinny być stosowane ponieważ ich zakres regulacji z charakterystyką liniową ogranicza się tylko do nieznacznego obszaru na początku otwarcia zaworu, pozostała większa część skoku to charakterystyka szybkootwierająca bardzo ułomna w procesie regulacji.

Dla wyznaczenia strumienia wydmuchu oparów potrzebne są następujące informacje:

- k_{vs} współczynnik przepływu zastosowanego zaworu [m^3/h] wg danych producenta zastosowanego zaworu,
- stopień otwarcia zaworu wydmuchu oparów, oszacowany w oparciu o pomiary:
 - S_r regulacyjnego otwarcia zaworu [mm lub %] i
 - S_{100} pełnego skoku zaworu [mm lub %]

Przy założeniu charakterystyki liniowej zaworu wydmuchu oparów możemy określić współczynnik przepływu zaworu k_v [m^3/h] dla zrealizowanej nastawy zaworu regulacyjnego:

$$k_v = \frac{S_r}{S_{100}} \times k_{vs} \quad (3)$$

Wyznaczony w ten sposób współczynnik przepływu k_v dla zrealizowanej nastawy zaworu możemy wprowadzić do wzoru (4), na bazie którego określamy wielkość strumienia oparów $m_{\text{oparów}}$ [kg/h] dla parametrów ruchowych w systemie odgazowywacza termicznego. Wzór (4) oparty jest o uproszczone formuły zdefiniowane w VDI/VDE 2173 dla przepływów podkrytycznych czynnika i zapewnia uzyskiwanie wystarczających przybliżeń wartości obliczeniowych. Można przy tych obliczeniach również skorzystać z oprogramowania producenta zastosowanego zaworu (o ile jest dostępne) opartego o formuły EN60534 i specyficzne współczynniki zaworu, takie obliczenia będą charakteryzowały się wyższą dokładnością.

$$m_{\text{oparów}} = 31,6 \times k_v \times \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_{\text{oparów}}}} \quad (4)$$

gdzie:

Δp [bar] ciśnienie różnicowe $p_1 - p_2$
 p_1 [bar(abs.)] ciśnienie w kolumnie odgazowywacza,
 p_2 [bar(abs.)] ciśnienie po stronie wydmuchu, najczęściej atmosferyczne
 $\nu''_{\text{oparów}}$ [m³/kg] objętość właściwa pary przy parametrach p_2 i t_1 z tablic parowych)

Dla rzadkich przypadków ciśnienia w kolumnie odgazowywacza termicznego $p_1 > 2$ [bar(abs.)] i wydmuchu oparów do atmosfery, należy zastosować wzór (4.1) dla nadkrytycznych przepływów czynnika.

$$m_{\text{oparów}} = 31,6 \times k_v \times \sqrt{\frac{p_1}{2 \times \rho_{\text{oparów}}}} \quad (4.1)$$

gdzie:

$\nu''_{\text{oparów}}$ [m³/kg] objętość właściwa pary przy parametrach $p_1/2$ i t_1 z tablic parowych)

Określenie strumienia oparów odprowadzanych z systemu odgazowywacza termicznego w oparciu o powyższe formuły uwzględniające szczegółowe dane konstrukcyjne i wartości nastaw zapewnia bardzo dobrze przybliżenie i wiarygodność dalszych rozważań w zakresie opłacalności zastosowania systemu odzysku ciepła oparów.

3.3 W oparciu o średnicę otworu dyszy wylotowej oparów

W przypadku, gdy producent systemu odgazowywacza termicznego zabudował na króćcu wydmuchu oparów zwężkę o określonej średnicy przelotu możemy strumień oparów szacować w oparciu o maksymalną przepustowość zwężki.

W tym celu możemy wykorzystać wzór przeliczeniowy (5) średnicy otworu dyszy d_0 [mm] na współczynnik przepływu dyszy k_v [m³/h], a następnie dla wyznaczenia masowego strumienia oparów $m_{\text{oparów}}$ [kg/h] wykorzystać wzór (4).

$$k_v = 0,0399859 \times C_d \times d_0^2 \quad (5)$$

gdzie:

C_d [-] współczynnik wypływu, dla otworów ostro krawędziowych $C_d = 0,60 - 0,65$

4 Strumień ciepła tracony podczas odprowadzania oparów

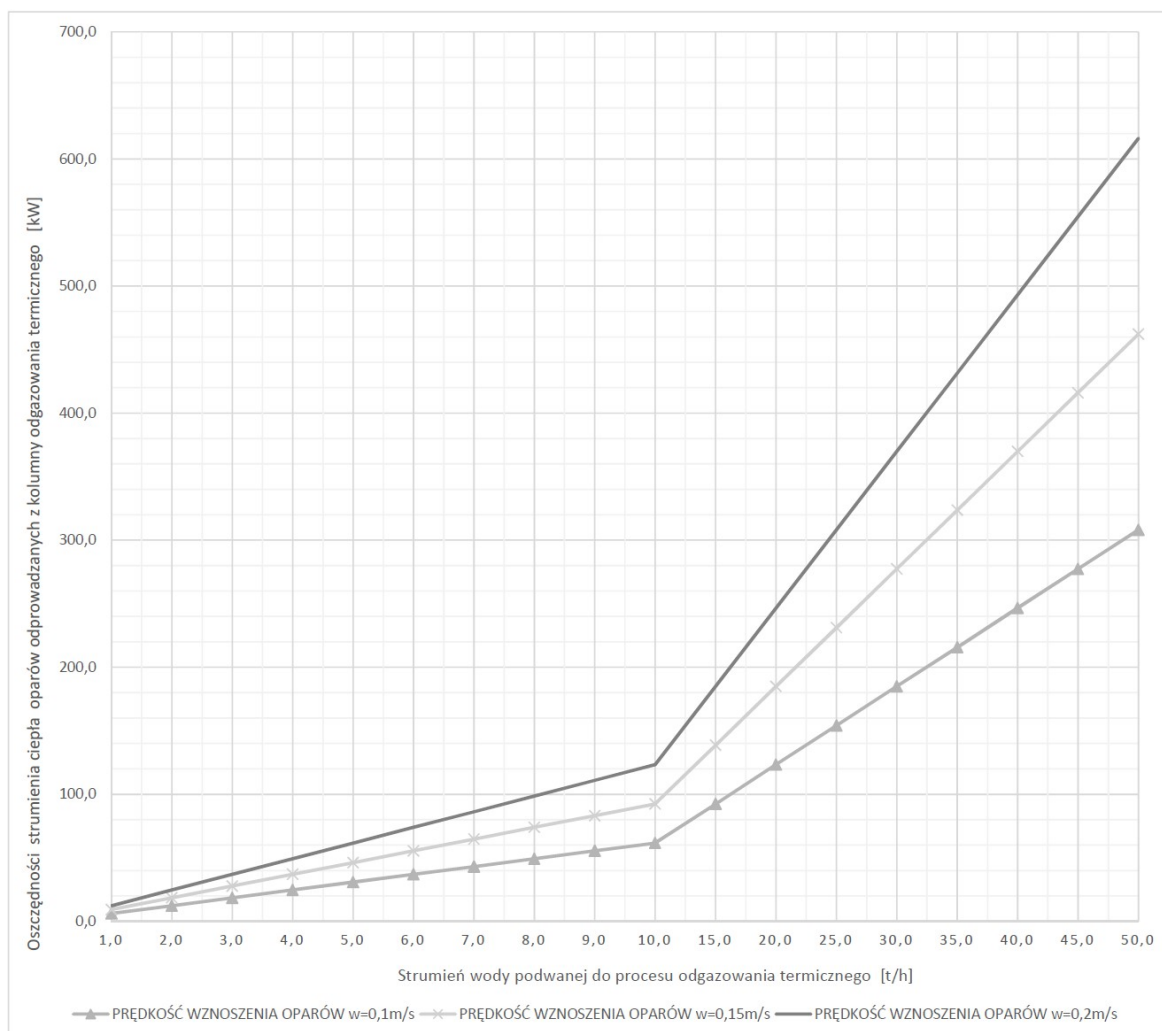
Kolejnym krokiem koniecznym w przeprowadzanej analizie opłacalności jest określenie strumienia ciepła traconego wraz z wydmuchiwanym strumieniem oparów. W tym celu wykorzystamy wzór (6), dzięki któremu określimy strumień ciepła traconego $Q_{\text{oparów}}$ [kW] podczas odprowadzenia wyznaczonego strumienia oparów $m_{\text{oparów}}$ [kg/h].

$$Q_{\text{oparów}} = \frac{m_{\text{oparów}} \times (h''_{\text{oparów}} - h_{\text{wu}})}{3600} \quad (6)$$

gdzie:

$h''_{\text{oparów}}$ [kJ/kg] entalpia oparów, zgodnie z uproszczeniem: entalpia pary wodnej nasyconej przy ciśnieniu roboczym w kolumnie odgazowywacza z tablic parowych

h_{wu} [kJ/kg] entalpia wody uzupełniającej ubytki oparów w systemie; korzystniej jest zastosować tu przewidywaną wartość temperatury wody po kondensacji pary zawartej w oparach (określamy wówczas faktyczne możliwości odzysku ciepła)



Rysunek 3. Możliwe oszczędności strumienia ciepła oparów odprowadzanych z kolumny odgazowywacza termicznego zależnie od maksymalnego strumienia wody podawanej do procesu odgazowania i prędkości wznoszenia oparów w kolumnie

W oparciu o wzór (6) można wyznaczyć strumień ciepła traconego dla indywidualnie określonego za pomocą wzorów (4) lub (4.1) oraz (5) strumienia wydmuchu oparów, a uzyskaną wartość ciepła traconego wykorzystać w dalszych obliczeniach.

Opierając się na wzorze (6) można również przeprowadzić kompleksowe obliczenia dla szeregu wydajności kotłowni parowych przy założeniu strumienia wydmuchu oparów zdefiniowanego wzorem (2). Takie obliczenia zostały przedstawione w formie graficznej na rysunku 3. W obliczeniach tych przyjęto ciśnienie w kolumnie odgazowywacza 0,2 barg, a przeprowadzono je dla różnych prędkości wznoszenia oparów w kolumnie. Dla przypomnienia: w celu szacowania wartości strumienia ciepła traconego zaleca się przyjmowanie większych wartości prędkości wznoszenia dla mniejszych wydajności maksymalnych kotłowni parowej, a mniejszych prędkości wznoszenia dla większych wydajności kotłowni. Wykres ten umożliwia szybkie, ale przybliżone szacowanie straty ciepła wydmuchu przez użytkownika kotłowni.

5 Koszt traconego ciepła odpadowego

Po określeniu strumienia ciepła traconego podczas wydmuchu oparów z systemu odgazowania kolejnym krokiem jest oszacowanie kosztów tej straty. Jeżeli w zakładzie prowadzony jest rachunek kosztowy 1kWh energii zawartej w nośniku ciepła jakim jest para, w dalszych obliczeniach możemy posłużyć się tym wskaźnikiem wprowadzonym bezpośrednio do wzoru (8). W przypadku braku takiej analizy, można wykorzystać metodykę uproszczoną wyznaczenia ceny 1kWh ciepła w parze opartą na wzorach (7.1) dla paliw stałych i ciekłych oraz (7.2) dla paliw gazowych.

W przypadku paliw stałych i ciekłych koszt 1kWh ciepła w parze $K_{kWh\ para}$ [PLN/kWh] określamy w oparciu o wzór (7.1)

$$K_{kWh\ para} = \frac{3,6 \times C_{paliwa}}{1000 \times Q_w^r \times \eta} \quad (7.1)$$

gdzie:

C_{paliwa} [PLN/t]	cena jednostkowa paliwa stałego lub ciekłego
Q_w^r [MJ/kg]	wartość opałowa paliwa stałego lub ciekłego
η [-]	sprawność kotła parowego

W przypadku paliw gazowych koszt 1kWh ciepła w parze $K_{kWh\ para}$ [PLN/kWh] określamy w oparciu o wzór (7.2)

$$K_{kWh\ para} = \frac{3,6 \times C_{paliwa}}{Q_w^r \times \eta} \quad (7.2)$$

gdzie:

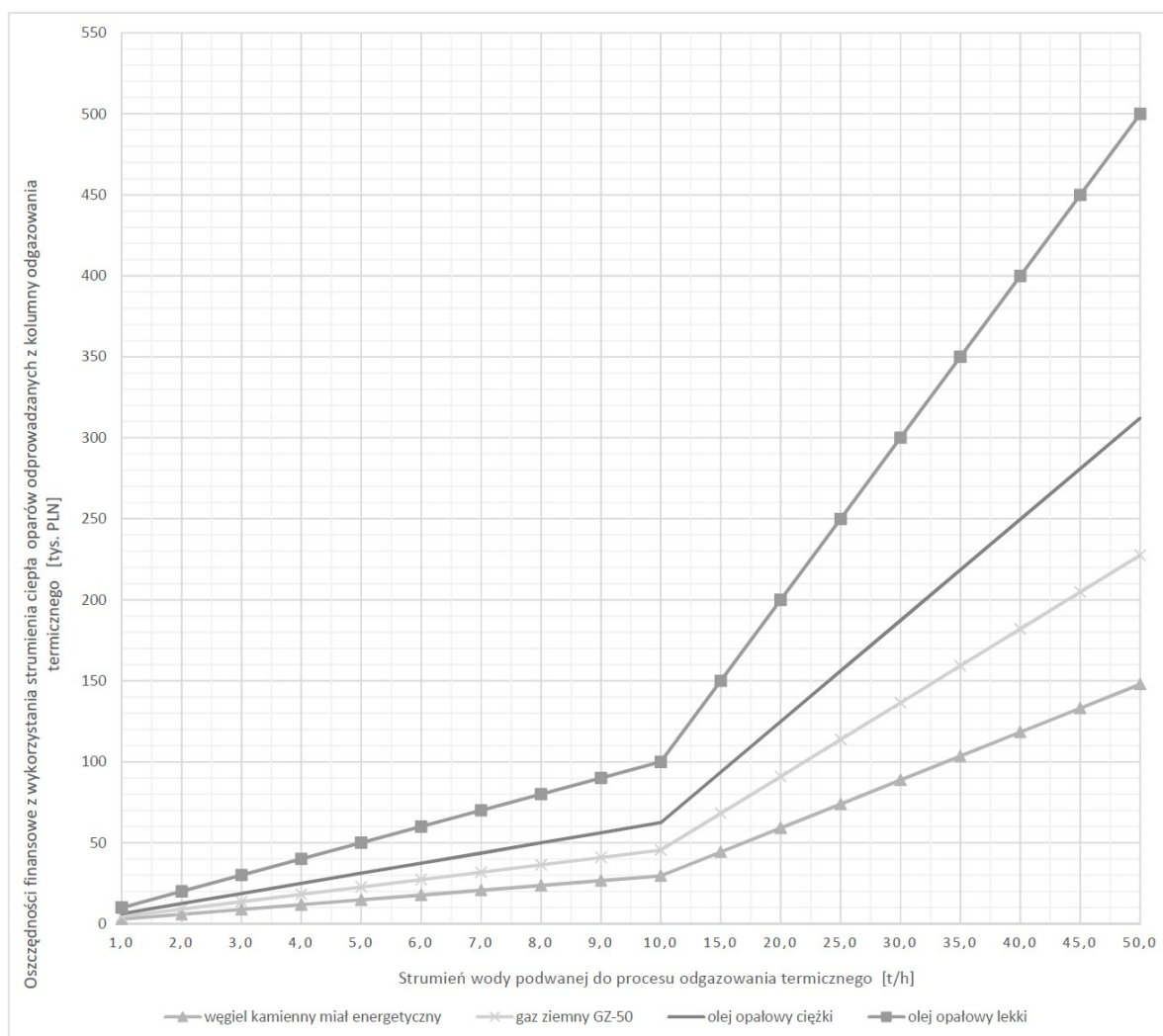
C_{paliwa} [PLN/norm.m ³]	cena jednostkowa paliwa gazowego
Q_w^r [MJ/norm.m ³]	wartość opałowa paliwa gazowego
η [-]	sprawność kotła parowego

Wyznaczając strumień ciepła traconego z wydmuchiwanymi oparami $Q_{oparów}$ [kW] w oparciu o wzór (6) oraz koszt 1 kWh ciepła w parze $K_{kWh\ para}$ [PLN/kWh] w oparciu o wzory (7.1) lub (7.2) można – szacując roczny czas pracy odgazowywacza T_{pracy} [h/a] – obliczyć koszt ciepła traconego w ciągu roku z wydmuchiwanymi oparami z systemu odgazowywacza $K_{oparów}$ [PLN/a] korzystając ze wzoru (8).

$$K_{\text{oparów}} = K_{\text{kWh para}} \times Q_{\text{oparów}} \times T_{\text{pracy}} \quad (8)$$

Obliczenia kosztu ciepła traconego z oparami wydmuchiwanymi z systemu odgazowywacza termicznego pokazują jaką roczną stratę finansową ponosi zakład w związku z koniecznością zapewnienia poprawnej pracy systemu odgazowywacza termicznego. W dalszych rozważaniach przedstawione zostaną propozycje wykorzystania ciepła wydmuchu oparów, a obliczone koszty ciepła traconego będą stanowiły bazę w szacowaniu opłacalności proponowanej modernizacji systemu odzysku ciepła traconego.

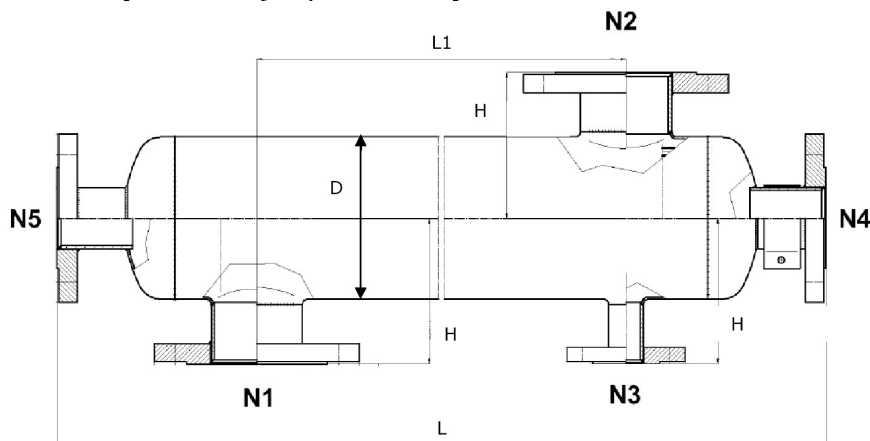
W celu szybkiego wstępnego szacowania kosztu traconego z wydmuchiwanymi oparami z systemu odgazowywacza termicznego, czyli równocześnie szacowania możliwych do osiągnięcia oszczędności dzięki wykorzystaniu ciepła wydmuchu, opracowany został wykres – rysunek 4 – pokazujący zależność uzyskiwanych oszczędności w funkcji wydajności maksymalnej kotłowni parowej i zastosowanego paliwa, wykres został przygotowany w oparciu o następujące wartości charakterystyczne: prędkość wznoszenia oparów 0,1m/s, czas pracy 6000h/a, węgiel kamienny $Q_w^r=24\text{MJ/kg}$ / $\eta=0,75$ / $C_{\text{paliwa}}=400\text{PLN/t}$, olej opałowy lekki $Q_w^r=42,6\text{MJ/kg}$ / $\eta=0,85$ / $C_{\text{paliwa}}=2720\text{PLN/t}$, olej opałowy ciężki $Q_w^r=39,7\text{MJ/kg}$ / $\eta=0,8$ / $C_{\text{paliwa}}=1490\text{PLN/t}$, gaz ziemny GZ50 $Q_w^r=39\text{MJ/norm.m}^3$ / $\eta=0,9$ / $C_{\text{paliwa}}=1,2\text{PLN/norm.m}^3$.



Rysunek 4. Możliwe oszczędności finansowe [tys. PLN] w przypadku wykorzystania strumienia ciepła oparów odprowadzanych z kolumny odgazowywacza termicznego zależnie od maksymalnego strumienia wody podawanej do procesu i stosowanego paliwa

6 Wymiennik odzysku ciepła oparów i sposób jego zabudowy

Konstrukcja wymiennika odzysku ciepła oparów z systemu odgazowywacza termicznego musi zapewnić bezproblemowe odprowadzenie gazów składowych oparów, jak również skroplin z pary zawartej w oparach. Wymiennik ten musi być zabudowany powyżej zaworu regulacji wypływu strumienia oparów z odgazowywacza termicznego. Dla zapewnienia właściwego rozdziału fazy gazowej i ciekłej wewnątrz wymiennika opary – rysunek 5 - wprowadza się do płaszcza zbiornika od dołu przez króciec N1, gazy wyprowadzane są do góry przez króciec N2 do wydmuchu na dachu budynku, a skropliny w dół przez króciec N3 i następnie odwadniacz pływakowy do bezciśnieniowego zbiornika kondensatu. Czynnik odbierający ciepło oparów przepływa przeciwnie do kierunku przepływu oparów w rurkach zabudowanych wewnątrz płaszcza wymiennika od króćca N4 do N5.



Rysunek 5. Wymiennik płaszczowo rurowy odzysku ciepła oparów wydmuchiwanym z odgazowywacza termicznego



Rysunek 6. Przykład zabudowy wymiennika odzysku ciepła oparów z procesu odgazowania termicznego na kotłowni parowej

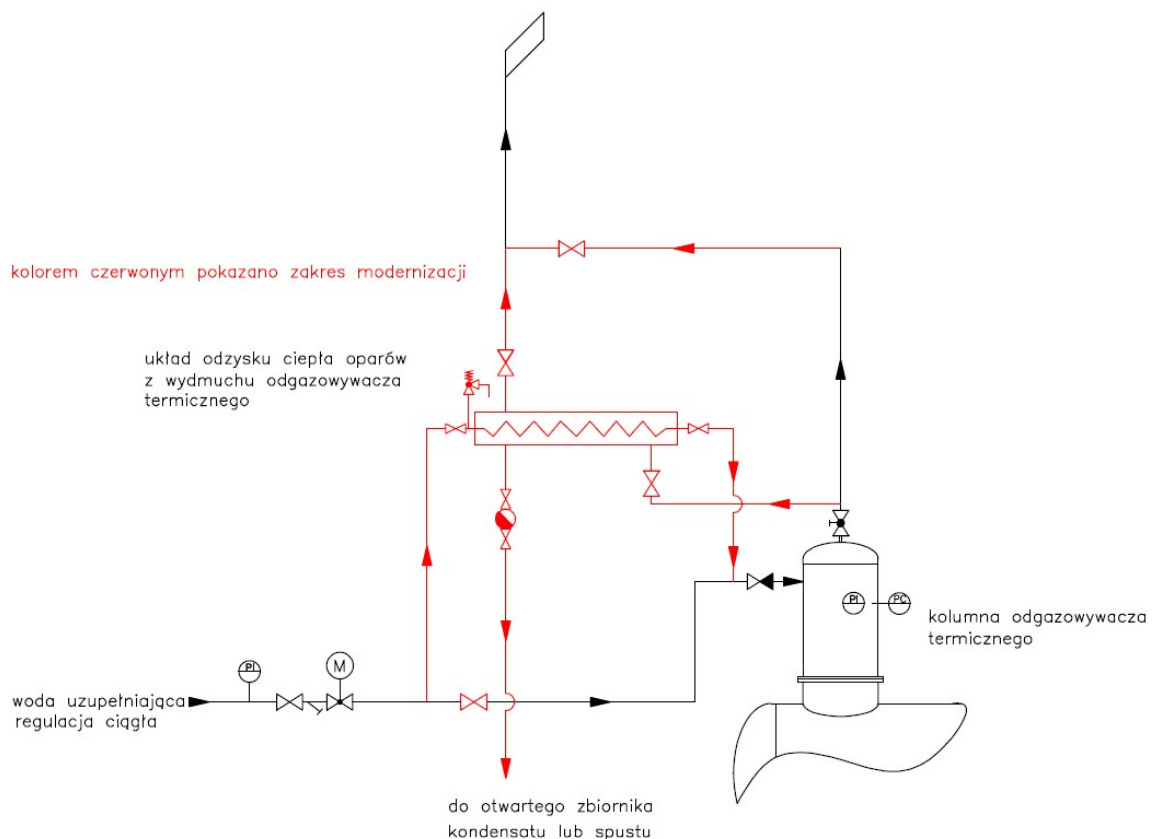
Ze względu na korozyjne oddziaływanie gazów ponownie rozpuszczających się w schłodzonych skroplinach pary z oparów, wymiennik musi być wykonany ze stali nierdzewnej. Pole przekroju czynnego przepływowo w wymienniku musi być większe niż pole przekroju rurociągu wydmuchowego oparów z kolumny odgazowania termicznego.

Zależnie od temperatury początkowej czynnika odbierającego ciepła, dzięki odpowiednio dobranej powierzchni wymiany ciepła, możliwe jest zapewnienie całkowitej kondensacji pary w oparach oraz schłodzenie oparów do temperatury nieznacznie wyższej od temperatury czynnika chłodzącego. Stopień odzysku ciepła jest tym większy im niższa jest temperatura początkowa czynnika chłodzącego. Przykład zabudowy i wykorzystania wymiennika odzysku ciepła oparów pokazano na rysunku 6.

7 Wybrane propozycje rozwiązań systemów odzysku ciepła oparów

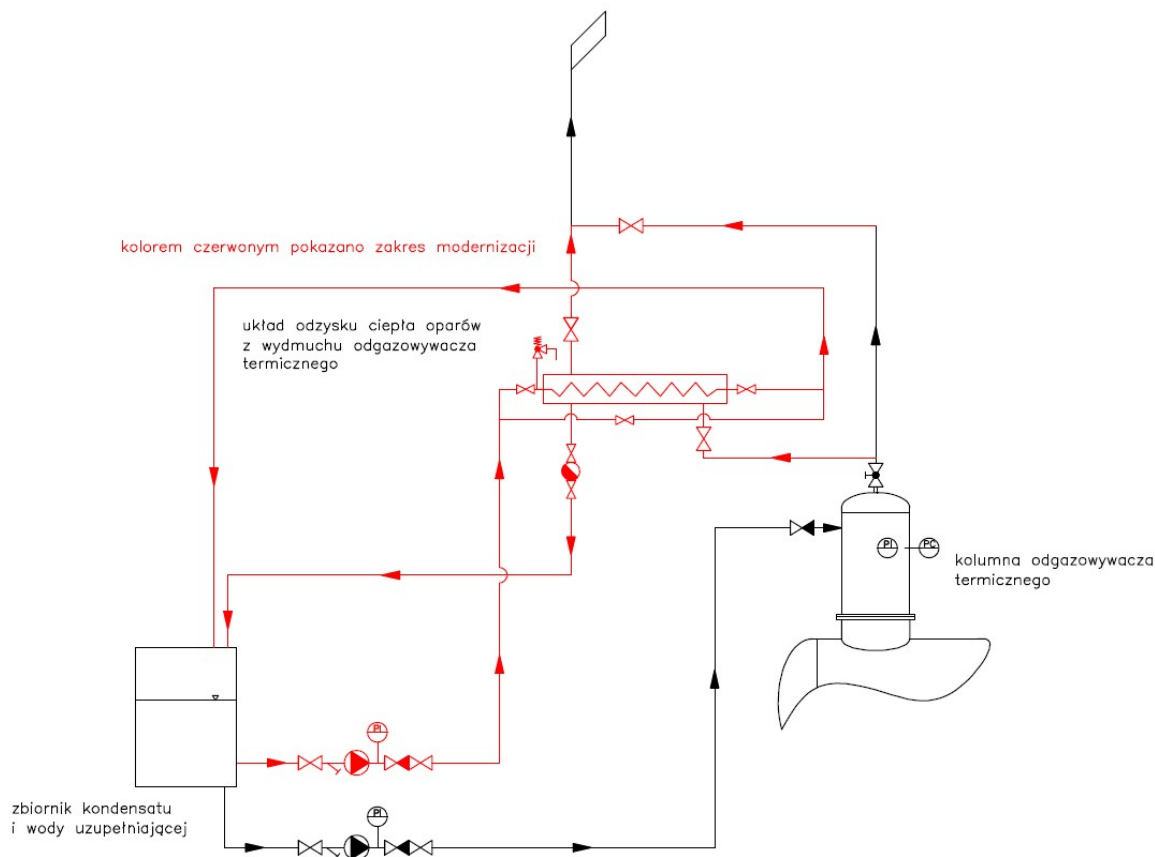
Dla zapewnienia optymalizacji procesu wykorzystania ciepła traconego należy szczególną uwagę zwrócić na konstrukcję i budowę całego systemu odzysku ciepła. Najczęściej stosowane są dwa rozwiązania:

- wykorzystanie regulowanego strumienia wody uzupełniającej podawanej do kolumny odgazowywacza – rysunek 7, jako czynnika chłodzącego w wymienniku odzysku ciepła oparów; rozwiązanie to jest tańsze konstrukcyjnie, ale wymaga zastosowania układu ciągłej regulacji dopływu wody uzupełniającej do procesu odgazowania (w przypadku regulacji interwałowej, odbiór ciepła traconego będzie tylko okresowy). Zależnie od strumienia oparów, strumienia wody uzupełniającej oraz zastosowanego systemu odgazowania może okazać się konieczne zastosowanie dodatkowego układu podgrzewu parą strumienia wody uzupełniającej za wymiennikiem odzysku oparów w celu zapewnienia wymaganej temperatury wody uzupełniającej doprowadzanej do kolumny odgazowywacza.



Rysunek 7. Propozycja modernizacji systemu odgazowania o wymiennik odzysku ciepła oparów zabudowany na regulowanym w sposób ciągły układzie doprowadzenia wody uzupełniającej do procesu

- wykorzystanie buforowego zbiornika wody uzupełniającej lub mieszaniny wody uzupełniającej i kondensatu jako akumulatora ciepła odzyskiwanego z wydmuchu oparów – rysunek 8, w przypadku takiego rozwiązania zapewnione jest ciągłe i całkowite wykorzystanie ciepła oparów bez zmiany istniejącego rozwiązania interwałowego podawania wody na kolumnę odgazowywacza.



Rysunek 8. Propozycja modernizacji systemu odgazowania o wymiennik odzysku ciepła oparów zasilany w sposób ciągły wodą tłoczoną ze zbiornika, w którym dochodzi do akumulacji odzyskiwanego ciepła

Podane powyżej przykłady nie pokazują pełnego zakresu możliwych rozwiązań układów odzysku ciepła z wydmuchu oparów z procesu odgazowania termicznego. Konkretnie rozwiązanie systemu odzysku ciepła musi być dopasowane do rozwiązań konstrukcyjnych istniejącego systemu kotłowni parowej.

8 Koszty inwestycyjne systemów odzysku ciepła oparów

Na koszty inwestycyjne I [PLN] składa się koszt urządzeń, które wymagają instalacji oraz koszt montażu tych urządzeń. Bez przygotowania konkretnej propozycji rozwiązania technicznego nie ma możliwości dobrego szacowania kosztu inwestycyjnego. Szacunkowa ocena tych kosztów jest dostępna na zapytanie.

9 Obliczenia opłacalności zastosowania systemu odzysku ciepła oparów

W celu określenia opłacalności inwestycji możemy posłużyć się najprostszym wskaźnikiem jakim jest okres zwrotu inwestycji OZ [w latach] opisany wzorem (9). Mimo, że wskaźnik ten nie uwzględnia wielu czynników zmiennych, w tym przypadku w wystarczającym zakresie pozwala oszacować opłacalność inwestycji.

$$OZ = \frac{I}{P - K_{\text{eksploatacyjny}}} \quad (9)$$

gdzie:

I	[PLN]	całkowity koszt inwestycji związanej z modernizacją systemu odgazowania o układ odzysku ciepła oparów z procesu odgazowania
P	[PLN/a]	roczny zysk wynikający z modernizacji, jeżeli zastosowany zostanie system zapewniający praktycznie całkowite wykorzystanie ciepła traconego, można przyjąć $P = K_{\text{oparów}}$
$K_{\text{eksploatacyjny}}$	[PLN/a]	koszty wynikające z bieżącej eksploatacji systemu odzysku ciepła oparów, najczęściej ograniczają się do kosztu zasilania elektrycznego pompy wody odbierającej ciepło oparów, jeżeli w systemie nie zastosowano dodatkowej pompy można przyjąć $K_{\text{eksploatacyjny}} = 0$

10 Przykład obliczeń opłacalności zastosowania systemu odzysku ciepła oparów

Założenia:

- kotłownia parowa o wydajności ok. 8 t/h
- paliwo: gaz GZ-50, wartość opałowa 39MJ/norm.m³, cena 1,2 PLN/norm.m³, sprawność kotłów 0,9
- wydmuch oparów z kolumny odgazowującej z zaworem DN32 o kvs=15,4m³/h, stopień otwarcia zaworu 45%, ciśnienie w systemie odgazowania 0,2barg (1,2 bara)
- czas pracy instalacji 6000h/a

Wyniki obliczeń kosztu ciepła traconego

- wg wzoru (3) $k_v = 6,93 \text{ m}^3/\text{h}$
- wg wzoru (4) $m_{\text{oparów}} = 81,9 \text{ kg/h}$
- wg wzoru (6) $Q_{\text{oparów}} = 55,3 \text{ kW}$ (założone schładzanie do ok. 60°C)
- wg wzoru (7.2) $K_{\text{kWh para}} = 0,123 \text{ PLN/kWh}$
- wg wzoru (8) $K_{\text{oparów}} = P = 40.811 \text{ PLN/a}$

Po przeprowadzeniu powyższych obliczeń zaproponowany został następujący system odzysku ciepła oparów z systemu odgazowania termicznego:

- rozwiązanie pokazane na rysunku 8,
- wymiennik odzysku ciepła oparów o powierzchni wymiany ciepła ok. 4m²
- ze względu na temperaturę mieszaniny kondensatu i wody uzupełniającej w zbiorniku równą 60°C dla tłoczenia wody zasilającej zastosowana została pompa o wydajności ok. 4m³/h dla uzyskania wzrostu temperatury czynnika odbierającego ciepło o ok. 10K
- dla takiego rozwiązania oszacowany całkowity koszt inwestycji wyniósł ok. I = 30.000 PLN
- koszt eksploatacyjny związany z pracą pompy 0,55kW, przez 6000 h/a oszacowano przy cenie energii elektrycznej 0,55 PLN/kWh jako:
 $K_{\text{eksploatacyjny}} = 0,55 \times 6000 \times 0,55 = 1815 \text{ PLN/a}$

Korzystając ze wzoru (9) można określić czas zwrotu inwestycji jako $OZ = 0,78$ [roku] czyli nieco ponad 9 miesięcy. Taki wskaźnik opłacalności inwestycji zdecydował, że podjęta została decyzja o przeprowadzeniu zaproponowanej modernizacji systemu odgazowania termicznego o układ odzysku traconego ciepła oparów.

11 Podsumowanie

Zastosowanie systemów odzysku ciepła oparów z procesu odgazowania termicznego wiąże się z uzyskiwaniem wymiernych oszczędności finansowych dla zakładu wytwarzającego parę na potrzeby procesów produkcyjnych. Metodyka określenia opłacalności zastosowania systemu odzysku została w sposób przejrzysty opisana powyżej. Dzięki wykresom zawartym w artykule przedstawiono również narzędzie do zgrubnego szacowania wielkości strat wydmuchu oparów i potencjalnych oszczędności w funkcji wydajności z jaką pracuje kotłownia parowa.

Rachunek ekonomiczny opisanej inwestycji będzie jeszcze bardziej korzystny, jeżeli uwzględnimy koszty związane ze zmniejszeniem emisji CO₂ (szczególnie w przypadku kotłowni węglowych).

Systemy odzysku ciepła oparów z procesu odgazowania termicznego, to podstawowe elementy wyposażenia nowoczesnej kotłowni, której użytkownik stawia na ekonomiczne prowadzenie procesu wytwarzania pary.

Wiele innych szczegółowych opracowań w temacie systemy pary i kondensatu znajdzie czytelnik na mojej stronie internetowej: www.szalucki.pl
Serdecznie zapraszam.

Krzysztof Szalucki

tel. 667994413

e-mail: krzysztof@szalucki.pl

www.szalucki.pl