

dr inż. Piotr Nikończuk

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Techniki Morskiej i Transportu
Al. Piastów 41, 71-065 Szczecin, Poland
E-mail: piotr.nikonczuk@zut.edu.pl

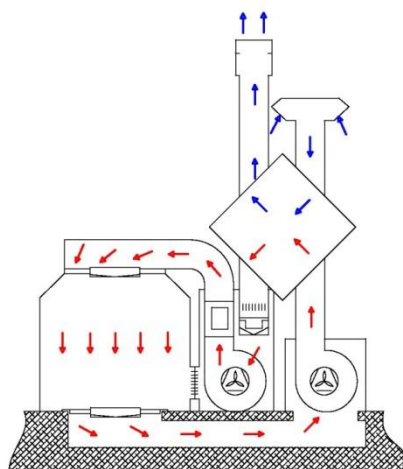
Wstępny model sedymentacji osadów lakierniczych w rekuperatorze kabiny lakierniczej

Słowa kluczowe: kabina lakiernicza, sedymentacja, mgła lakiernicza, osady lakiernicze.

Streszczenie: Odkładające się na lamelach rekuperatora osady lakiernicze powodują problemy eksploatacyjne. Przekroje poprzeczne kanałów rekuperatora stopniowo zmniejszają się i ostatecznie prowadzi to do zatkania rekuperatora. Oprócz oporów przepływu powietrza osady stanowią również opór termiczny przy wymianie ciepła. W artykule przedstawiono wstępne wyniki modelowania procesu sedymentacji drobin lakieru. Zaprezentowano model powstawania mgły lakierniczej zawierającej krople lakieru o określonej średnicy oraz stopień koncentracji drobin lakieru w kanale wentylacyjnym za filtrem. Wyniki symulacji porównano z wynikami pomiarów w rzeczywistych kabinach lakierniczych.

1. Wprowadzenie

Podczas pracy kabiny lakierniczej w trybie lakierowania powietrze w kabine lakierniczej jest stale wymieniane. Zużyte, ciepłe powietrze jest wyrzucane z przestrzeni roboczej kabiny. Dążąc do poprawy efektywności energetycznej kabin lakierniczych stosuje się instalacje odzysku ciepła. Najczęściej wykorzystywane są rekuperatory krzyżowe. Konstrukcja rekuperatorów krzyżowych opiera się na budowie lamelowej, gdzie lamele z cienkiej blachy aluminiowej oddzielają na przemian strumienie ciepłego i zimnego powietrza. Odległość pomiędzy lamelami znajduje się przedziale 12-15 mm. Na rysunku 1 przedstawiono schemat klasycznego rozwiązania kabiny lakierniczej z rekuperatorem krzyżowym.



Rys. 1 Lokalizacja rekuperatora w klasyczne rozwiązanie kabiny lakierniczej
Fig. 1A location of the heat exchanger in typical booth assembly

W ciepłym powietrzu znajdują się cząstki stałe mgły lakierniczej, które tworzą osady lakiernicze na ściankach kanałów wentylacyjnych wyrzutni. Osady lakiernicze powstają również na lamelach rekuperatora. Na rysunku 2 przedstawiono rekuperator zanieczyszczony osadami lakierniczymi.



Rys. 2 Rekuperator zanieczyszczony osadami lakierniczymi
Fig. 2 Recuperator fins contaminated with overspray sediments

Odkładająca się warstwa osadów powoduje opór termiczny dla wymiany ciepła w rekuperatorze oraz zmniejsza przekrój kanałów rekuperatora powodując opory przepływu powietrza [14], [15]. Ostatecznie narastająca warstwa osadów powoduje utratę drożności rekuperatora. Związane jest to z powstawaniem zagrożenia wybuchem i wyłączeniem kabiny lakierniczej z eksploatacji. Ocenę prawdopodobieństwa wybuchu w kabine lakierniczej przedstawiono w pracy [24] w odniesieniu do malarni proszkowej.

Problematyka wpływu osadów na warunki eksploatacyjne obiektów technicznych jest obecna w wielu dziedzinach, dotyczy to między innymi silników spalinowych [1], [23]. W tematyce kabin lakierniczych problematyka osadów była traktowana w sposób znikomy ze względu na przekroje kanałów wentylacyjnych rzędu 0,8 – 1 [m]. Kilkumilimetrowe warstwy osadów nie mają znaczącego wpływu na zmianę oporów przepływu powietrza w kanałach. Dopiero pojawienie się rekuperatorów w instalacjach wentylacyjnych kabin, spowodowało zauważalność zjawiska sedymentacji mgły lakierniczej. W dokumentacji techniczno ruchowej kabin lakierniczych z rekuperatorami często pomija się potrzebę oczyszczania rekuperatorów. Nie określono stanów granicznych w stosunku do grubości osadów oraz minimalnego przekroju poprzecznego kanału w rekuperatorze. Stany graniczne pozwalają określić czas eksploatacji tak jak w przypadku ciepłociągów [17] lub wałów korbowych silników [21]. Wolumen objętości aplikowanego lakieru ma znaczący wpływ na grubość osadów lakierniczych, przyjmuje on jednak wartości zmienne w czasie eksploatacji kabiny lakierniczej. Wymaga to określenia stałych odstępów czasowych pomiędzy przeglądami rekuperatora lub przyjęcia strategii quasi-okresowej [8].

Prowadzone są prace badawcze nad atomizacją lakierów [19] oraz efektywnością transferu pistoletów lakierniczych [18], [22]. Wydawane są regulacje i zalecenia dotyczące efektywności transferu poprzez stosowanie niskociśnieniowych pistoletów lakierniczych HVLP (High Volume Low Pressure) [26], [27]. Publikacje na temat rozmiaru mgły lakierniczej rozpatrują ją przede wszystkim w aspektach zdrowotnych i środowiskowych. Istnieje również wiele publikacji dotyczących efektywności filtrów cząstek stałych mgły lakierniczej typu „*paint stop*” [4], [6], [7] innymi mediami [10], [12] lub alternatywnymi

metodami [20], [25]. Nie ujmują one jednak aspektów wpływu poszczególnych elementów na warunki eksploatacyjne kabiny lakierniczej. Problematyka atomizacji i efektywności transferu stanowi również obszerne zagadnienie w tematyce oprysków rolnych [9], [11],[13].

Modele matematyczne i symulacyjne sedymentacji drobin na wewnętrznych ściankach kanałów w przepływie turbulentnym przedstawiono w pracach [2], [3] i [5]. W niniejszym artykule zaprezentowano wstępny model matematyczny i symulacyjny wzrostu osadów lakierniczych. Opracowany model uwzględnia adhezyjne właściwości kropeł lakieru. Tempo wzrostu warstwy osadów określane jest na podstawie czasu pracy kabiny w trybie lakierowania oraz wielkości strumienia objętości aplikowanego lakieru.

2. Zjawisko agregacji mgły lakierniczej

W trakcie aplikacji lakieru z pistoletu lakierniczego płynie strumień lakieru o wolumenie \dot{V}_P w postaci kropeł o zróżnicowanym rozmiarze. Wielkość kropeł jest związana jest z wieloma parametrami, takimi jak: rozmiar dyszy i nastaw pistoletu lakierniczego, rodzaj materiału lakierniczego, ciśnienie sprężonego powietrza, wolumen strumienia objętości lakieru, a także odległość dyszy pistoletu lakierniczego od lakierowanej powierzchni [19], i położenie dyszy [20]. Większość drobin lakieru osadza się na malowanej powierzchni tworząc powłokę lakierniczą. Pozostałe krople unoszą się w powietrzu i tworzą mgłę lakierniczą, która wyrzucana jest z przestrzeni roboczej kabiny lakierniczej wspólnie z wymianianym powietrzem. Wolumen objętości lakieru we mgle lakierniczej można określić za pomocą współczynnika efektywności transferu (*transfer efficiency*) TE :

$$\dot{V}_P^I = \dot{V}_P(1 - TE) \quad (1)$$

gdzie \dot{V}_P^I objętość lakieru we mgle lakierniczej [m^3/s]. Współczynnik efektywności transferu TE jest wartością bezwymiarową i określa stosunek objętości lakieru tworzącej powłokę lakierniczą do całkowitej objętości zużytego lakieru.

Wyrzucane powietrze oczyszczane jest z drobin lakieru za pomocą filtra typu *paint stop* umieszczonego zazwyczaj w podłodze lub ścianie kabiny lakierniczej. Efektywność filtra F_E opisuje procentową liczbę zatrzymanych drobin lakieru. Efektywność ta zależna jest od rozmiaru drobin lakieru [4], [7], [6], [10], [12], [20]. Dostawcy filtrów typu *paint stop* w swojej dokumentacji zamieszczają przedział skuteczności filtrów [30] lub wartość uśrednioną [29]. Ostatecznie objętość lakieru za filtrem \dot{V}_P^{II} można określić według zależności:

$$\dot{V}_P^{II} = \frac{\dot{V}_P^I(100 - F_E)}{100\%} \quad (2)$$

gdzie F_E oznacza efektywność filtra. Stopień koncentracji kropli lakieru p_c w strumieniu wyrzucanego powietrza \dot{V}_A za filtrem można określić w następujący sposób:

$$p_c = \frac{\dot{n}_P}{\dot{V}_A} \quad (3)$$

gdzie \dot{n}_p oznacza strumień drobin lakieru [1/s], strumień objętości wymianianego powietrza \dot{V}_A wyrażony jest w [m³/s]. Aby obliczyć liczbę drobin lakieru n_p można wykorzystać oczywistą zależność, iż całkowita objętość lakieru jest równa sumie objętości drobin:

$$V_p^II = \sum_{i=1}^{n_p} \frac{1}{6} \Pi d_i^3 \quad (4)$$

gdzie d_i oznacza średnicę i -tej drobinicy [m].

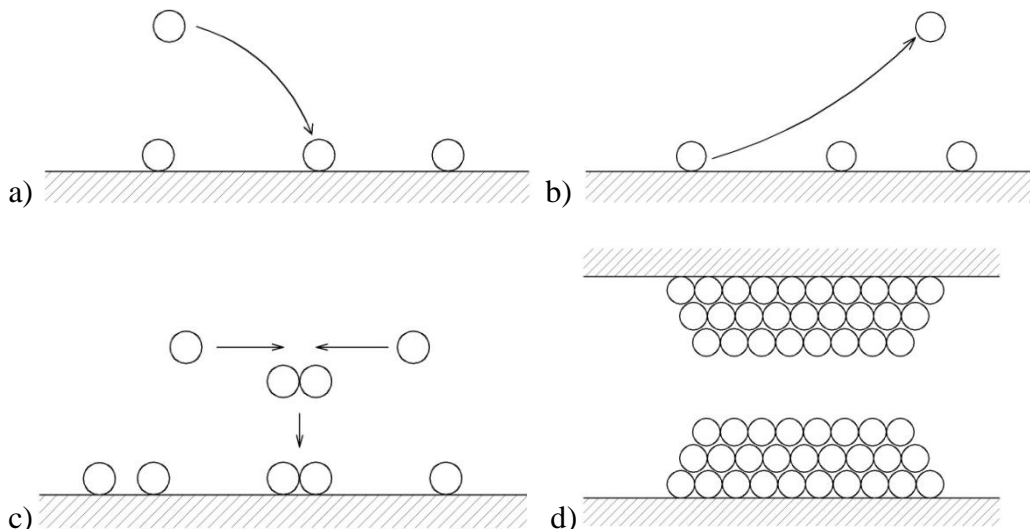
Przyjmując w uproszczeniu że wszystkie drobinicy lakieru mają unormowaną średnicę d_A , strumień drobin lakieru można określić z następującej zależności:

$$\dot{n}_p = \frac{6\dot{V}_p}{\Pi d_A^3} \quad (5)$$

Unormowana średnica drobin lakieru d_A uzależniona jest warunków atomizacji lakieru oraz odległości dyszy pistoletu lakierniczego od lakierowanej powierzchni. Strumień drobin lakieru wyrażony jest liczbą powstałych drobin w ciągu jednej sekundy.

3. Ogólny model zjawiska osadzania się cząstek w przepływie turbulentnym

Prowadzone są badania nad zjawiskami sedymentacji drobin zawartych w strumieniach o przepływie turbulentnym [2], [5]. Stochastyczny model sedymentacji cząstek oraz zaklejanie kanału wentylacyjnego został zaproponowany w podziale na cztery elementarne zjawiska [3]: osadzanie, unoszenie, aglomeracja oraz zatykanie. Na rysunku 3 przedstawiono poszczególne zjawiska.



Rys. 3 Elementarne zjawiska procesu osadzania a) osadzanie, b) unoszenie, c) aglomeracja, d) zatykanie

Fig.3 Elementary stages of deposition model a) deposition, b) resuspension, c) agglomeration, d) clogging

Model osadzania drobin na powierzchni jest opisany przez bilans energetyczny w kierunku normalnym do ścianki. Jest on rozpatrywany w dwóch podstawowych mechanizmach: hydrodynamicznym transporcie cząsteczek w przepływie turbulentnym oraz mechanizmie przylegania. Przyleganie oparte jest na interakcjach fizykochemicznych pomiędzy dwoma ciałami. Drobiny osadzają się na ścianie (lub na drobinach już osadzonych) gdy ich energia w kierunku normalnym do ścianki jest wystarczająca do przezwyciężenia bariery energii odbicia, a w przeciwnym razie odbijają się od powierzchni. Bariera energii określana jest przy użyciu teorii DLVO [3], nazwaną od autorów Derjaguin-Landau i Verwey-Overbeek. Teoria ta zakłada, że całkowita energia jest sumą energii interakcji:

$$U_{part-surf} = U_{part-plate}^{DLVO}(1 - S_{cov}) + \sum U_{part-part}^{DLVO} \quad (6)$$

gdzie: S_{COV} oznacza pokrycie powierzchni osadzonymi cząstkami, $U_{part-plate}$ oddziaływanie pomiędzy cząsteczką i czystą powierzchnią i $U_{part-part}$ oddziaływania między cząstkami. Powierzchnia styku S_{cont} określa obszar kontaktu i dana jest zależnością:

$$S_{cont} = \Pi \left(2\sqrt{d_{part}d_{dep}} + d_{dep} \right)^2 \quad (7)$$

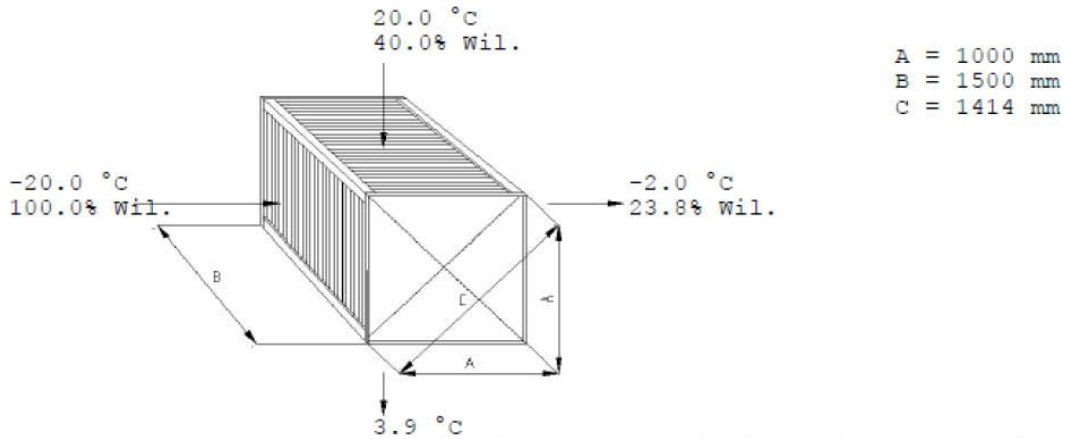
Gdzie d_{part} promień drobin i d_{dep} promień osadzonej drobin.

Jeśli w strefie kontaktu są obecne wcześniej osadzone drobin, losowo wybrana jest drobina na której osadzana jest kolejna pod losowo wybranym kątem.

Ze względu na zjawisko adhezji kropeł lakieru uznano, że w modelu sedimentacji lakierów praktycznie nie zachodzi faza unoszenia drobin lakieru. W przypadku gdy drobina przylgnie do powierzchni, to pozostaje w tym miejscu nieoderwalnie. W modyfikowanym modelu zaproponowano dwa dodatkowe zjawiska: możliwość aglomeracji na powierzchni oraz zjawisko wyrównywania. Aglomeracja na powierzchni polega na możliwości przesunięcia się drobin o odległość równą jej średnicy w kierunku innej, wcześniej osadzonej drobin. Wyrównywanie dotyczy przypadku gdy kropla osiada na innej wcześniej osadzonej drobinie i tworzy kolejną warstwę osadu. Gdy w sąsiedztwie osadzającej się kropli nie znajduje się żadna drobina położona nie mniej niż o jedną warstwę niżej, to drobina opada na sąsiednią pozycję w niższej warstwie. Jeżeli w bliskim sąsiedztwie znajduje się aglomeracja drobin, to kierunek opadania będzie związany z największą aglomeracją powstałych drobin. Aglomeracja na powierzchni i wyrównywanie mogą mieć miejsce tylko w momencie osadzania się cząsteczki oraz może to się odbywać tylko w rejonie o promieniu równym średnicy cząsteczki.

4. Model symulacyjny

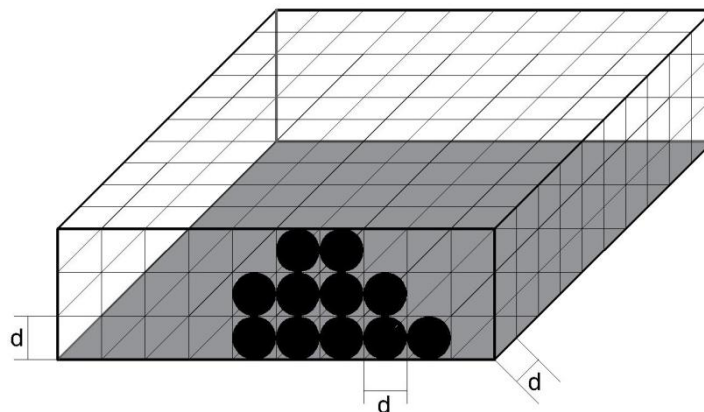
Dla zaproponowanego modelu opracowano model symulacyjny. Przyjęto geometrię kanału rekuperatora przedstawionego na rysunku 4. Rekuperator dedykowany jest dla kabin lakierniczych o strumieniu powietrza $\dot{V}_A = 5,56 [m^3/s]$ ($20\,000 [m^3/h]$) [28]. Na jego konstrukcję składają się kanały o szerokości $w_d = 1 [m]$ wysokości $h_d = 0,012 [m]$ oraz długości $l_d = 1 [m]$. Łącznie tworzy po 60 kanałów na przemian dla ciepłego i zimnego powietrza.



Rys. 4 Rekuperator dedykowany dla kabiny lakierniczej [28]

Fig. 4 Recuperator dedicated for spray booth [28]

Założono uproszczenie, że średnica kroplek lakieru d ma stałą unormowaną wartość. Powierzchnie lamel rekuperatora oraz przestrzeń pomiędzy nimi podzielono trójwymiarową siatką, składającą z sześciątów o boku równym średnicy drobiny. Na rysunku 5 przedstawiono model siatki.



Rys.5 Model siatki 3D dla symulacji numerycznych

Fig. 5 A model of 3D mesh for numerical simulations

Przyjęto strumień lakieru $\dot{V}_p = 3,33e-6 [m^3/s]$ (200 [ml/min]). Przy takim wolumenie lakieru i odległości dyszy pistoletu lakierniczego od pokrywanej powierzchni równej 0,3 [m] można przyjąć unormowaną średnicę kroplek lakieru równą $d = 10^{-4} [m]$ [19]. Strumień wymienianego powietrza przyjęto $\dot{V}_A = 5,56 [m^3/s]$ (20 000 [m³/h]). Efektywność transferu lakieru $TE=0,65$ określono na podstawie wytycznych Unii Europejskiej [26] zalecających stosowanie niskociśnieniowych pistoletów HVLP. Efektywność filtra $F_E = 94 [%]$ przyjęto na podstawie analizy kart katalogowych dystrybutorów filtrów [30].

Dla powyższych parametrów średnia prędkość przepływu powietrza pomiędzy lamelami wynosi $u = 7,7 [m/s]$. Dla tej prędkości liczba Reynoldsa przyjmuje wartość $Re=10828$ i wskazuje na przepływ burzliwy. Na podstawie ogólnie obowiązujących wzorów można określić wysokość warstwy przyściennej δ_x dla przepływu burzliwego [16]:

$$\delta_x = \frac{0.376x}{\text{Re}_x^{\frac{1}{5}}} \quad (8)$$

gdzie x oznacza odległość od krawędzi kanału natomiast Re_x opisuje miejscową liczbę Reynoldsa w punkcie x przy prędkości niezakłóconego przepływu $u_\infty [m/s]$:

$$\text{Re}_x = \frac{u_\infty x}{\nu} \quad (9)$$

Geometria kanałów rozważanej tu konstrukcji rekuperatora wymaga przeprowadzenia oddzielnej, szczególnej analizy warstwy przyściennej. Według równań (8) i (9) grubość warstwy w połowie długości kanału ($x=0,5 [m]$) wynosi $\delta_x = 0,0159 [m]$. Biorąc pod uwagę fakt, że wysokość kanału wynosi $h_d = 0,012 [m]$ wysokość warstwy przyściennej nie może przekraczać wysokości kanału. Według powyższego badania nad warstwą przyścienną w takim kanale wymagają szczególnej uwagi. Dla uproszczenia przyjęto, że w całej objętości wymianianego powietrza w burzliwym przepływie stopień koncentracji cząstek lakieru p_c jest jednolity. Dotyczy to również warstwy przyściennej. Podobne uproszczenia, stosowano również w innych modelach sedymentacji [3]. Stopień koncentracji drobin lakieru p_c opisuje przypadającą ich liczbę na 1 m^3 objętości strumienia powietrza. W modelowanej siatce przestrzennej, grubość warstwy przyściennej jest równa unormowanej średnicy drobin d . Stopień koncentracji kropli lakieru p_c^I w warstwie przyściennej przypadający na jej jeden metr kwadratowy [$1/m^2$] można określić według zależności

$$p_c^I = p_c d \quad (10)$$

Jako jedną iterację w procesie symulacji przyjęto czas jednej sekundy. Łączna liczba cząstek pojawiających się w warstwie przyściennej w czasie τ związana jest z prędkością przepływu powietrza

$$n_p = \int_0^\tau p_c^I F_s u_A dt \quad (11)$$

gdzie: F_s oznacza pole powierzchni lameli rekuperatora, na której odkładają się osady, u_A oznacza średnią prędkość powietrza:

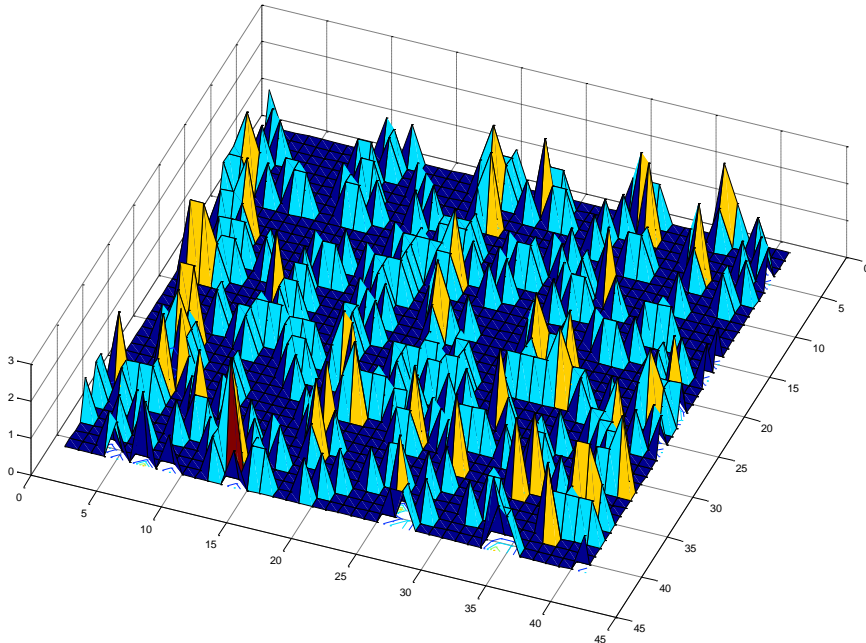
$$u_A = \frac{\dot{V}_A}{F_d} \quad (12)$$

Przekrój poprzeczny kanału wentylacyjnego F_d jest iloczynem wysokości kanału h_d oraz szerokości w_d . W modelu pominięto spadek ciśnienia powietrza w przekroju poprzecznym kanału F_d .

5. Wyniki symulacji

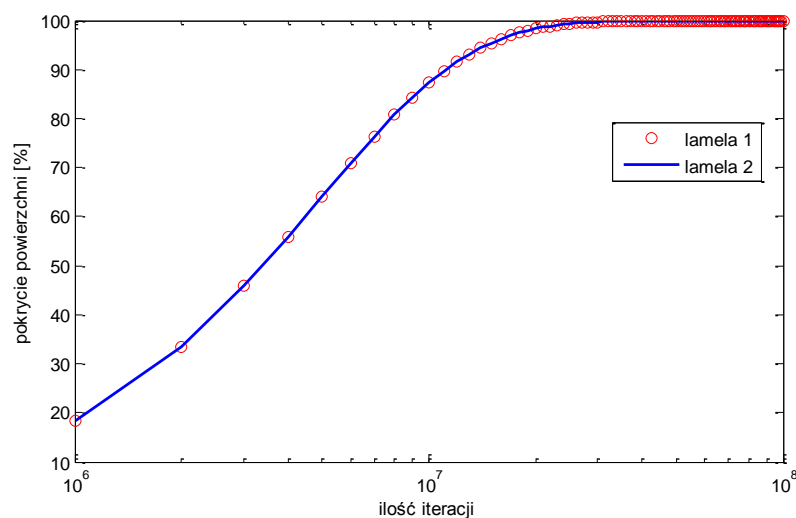
Dla przedstawionych wyżej parametrów przeprowadzono szereg symulacji. Wyniki obliczeń rozpatrywano szczególnie w aspekcie wzrostu stopnia pokrycia powierzchni lameli w kolejnych iteracjach, liczby narastających warstw oraz średniej wysokości osadów.

Prezentowane wyniki dotyczą powstawania osadów na dwóch lamelach stanowiących ściany kanału rekuperatora o szerokości $w_d = 1[m]$. Pominięto boczne ściany o wysokości $h_d = 0,012 [m]$. Na rysunku 6 przedstawiono fragment macierzy wynikowej przedstawiającej rozkład aglomeracji drobin lakieru po $1e6$ iteracji. Współrzędne na rysunku 6 odnoszą się do rozmiarów siatki prezentowanej na rysunku 5. Wobec powyższego prezentowana aglomeracja drobin lakieru dotyczy fragmentu lameli o wymiarach $4e-3 \times 4e-3 [m]$. Maksymalna liczba warstw osadów wynosi 3, co oznacza maksymalną wysokość aglomeracji $3 \cdot 10^{-4} [m]$.



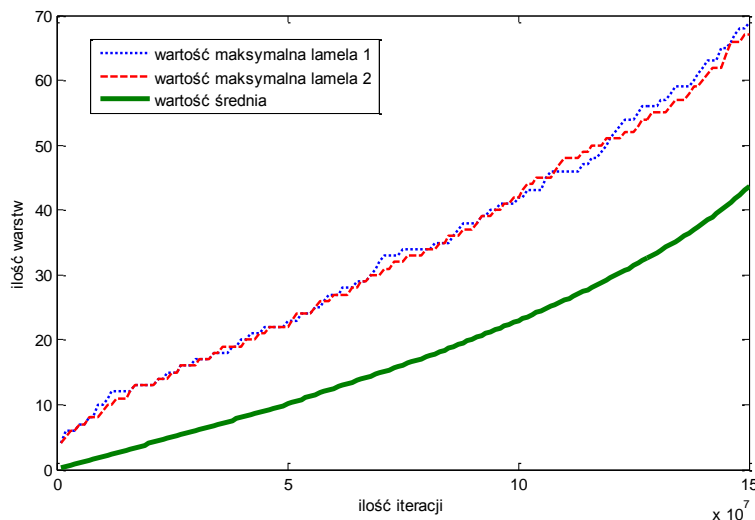
Rys. 6 Aglomeracja drobin lakieru po $1e6$ iteracji
 Fig. 6 Agglomeration of varnish particles after $1e6$ iterations

Stopień pokrycia powierzchni osadami po 10^6 iteracji jest stosunkowo niewielki nie osiąga 20%. Na rysunku 7 przedstawiono wzrost stopnia pokrycia powierzchni dwóch lamel rekuperatora w kolejnych iteracjach. Pokrycie bliskie 100% w obu przypadkach następuje po $12e7$ iteracji.



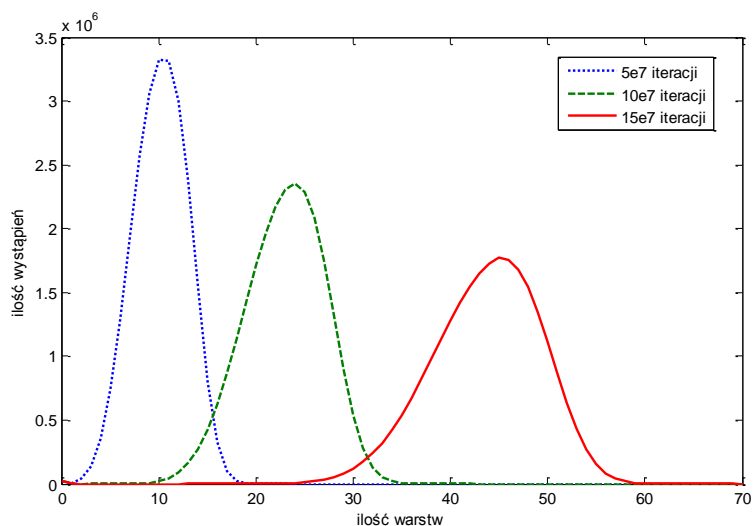
Rys. 7 Pokrycie lamel w kolejnych iteracjach
 Fig. 7 Coverage of fins in subsequent iterations

Maksymalną i średnią liczbę warstw osadów na lamelach w kolejnych iteracjach przedstawiono na rysunku 8. Wartości maksymalnych liczb warstw są niewiele zróżnicowane, natomiast średnia dla obu lameli są jednakowe.



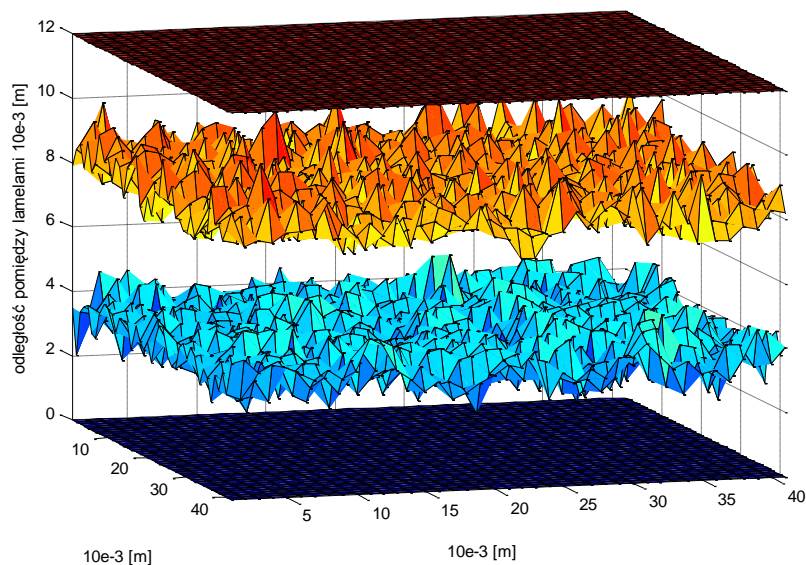
Rys. 8 Maksymalna i średnia liczba warstw osadów w kolejnych iteracjach
Fig. 8 Maximal and average number of layers in subsequent iterations

Rysunek 8 przedstawia maksymalną liczbę warstw, natomiast na rysunku 9 przedstawiono zmiany rozkładu wystąpień liczby warstw w aglomeracjach po wybranych iteracjach. Wybrano 5e7, 10e7 oraz 15e7 iteracji.



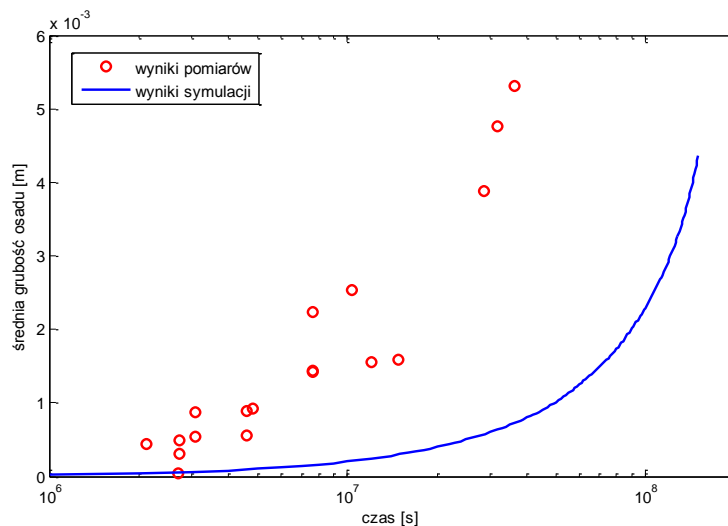
Rys. 9 Rozkład liczby warstw w aglomeracjach po wybranych iteracjach
Fig. 9 Distribution of number of layers in agglomerations after selected iterations

Jak wspomniano, stopień pokrycia lamel sięga wartość blisko 100% dopiero po 12e7 iteracji. Na rysunku 10 przedstawiono wizualizację koncentracji osadów w przestrzeni pomiędzy dwoma lamelami po 12e7 iteracji. Wizualizacja dotyczy fragmentu o powierzchni lamel jak na rysunku 6. Średnia wysokość osadów na górnej i dolnej lameli sięga $3e-3$ [m]. Powoduje to zmniejszenie o połowę przekroju poprzecznego kanału rekuperatora.



Rys. 10 Osady na lamelach rekuperatora po 12e7 iteracji
 Fig. 10 Sediments on recuperator fins after 12e7 iterations

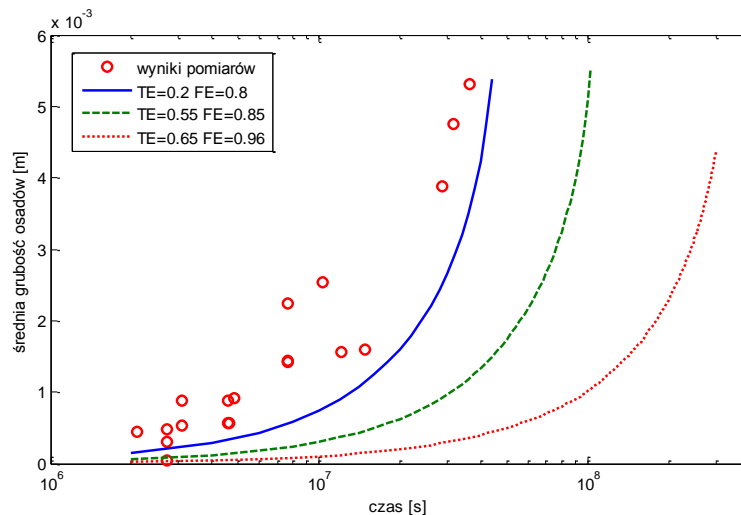
Jedna iteracja w symulacjach odnosi się do jednej sekundy pracy kabiny lakierniczej w trybie lakierowania i aplikacji lakieru. Na rysunku 11 przedstawiono porównanie wyników eksperymentu numerycznego z wartościami uzyskanymi na drodze doświadczalnej [15]. Wartości znacznie odbiegają od siebie.



Rys 11 Porównanie wyników symulacji z pomiarami
 Fig.11 Comparison of simulation and measurements results

Wyniki symulacji wskazują znacznie wolniejsze tempo wzrostu osadów w porównaniu do wyników rzeczywistych pomiarów. W modelu symulacyjnym przyjęto wartości zalecane dla efektywności transferu TE oraz maksymalną efektywność filtra F_E . Efektywność filtrów może być zróżnicowana [29], [30]. Z analizy wyników badań przeprowadzonych w przemyśle drzewnym i przedstawionych w pracy [22] wynika, że rzeczywista efektywność transferu z użyciem pistoletów HVLP waha się w przedziale $TE=$

20-60%. Zależy ona od rodzaju aplikowanego materiału, geometrii pokrywanej powierzchni oraz umiejętności lakiernika. Na rysunku 12 przedstawiono wyniki symulacji dla wartości efektywności transferu $TE = 0,20$ i $TE = 0,55$ oraz efektywności filtra $F_E = 80\%$ i $F_E = 85\%$ [29]. Uwzględniono również fakt, że całkowity czas pracy kabiny lakierniczej t_t stanowi sumę czasów lakierowania t_p , suszenia t_c i wentylacji t_v [15]. Przyjęto, że udział czasu lakierowania t_p stanowi połowę całkowitego czasu pracy kabiny lakierniczej t_t .



Rys. 12 Wyniki pomiarów i symulacji dla różnych wartości efektywności transferu TE i efektywności filtra F_E

Fig. 12 Results of measurements and simulations for different transfer efficiency TE and filter efficiency F_E

Przedstawione wyniki dotyczą wstępnego modelu sedimentacji drobin lakieru na lamelach rekuperatora. Zastosowano kilka uproszczeń. Otrzymane wartości porównano z rzeczywistymi wynikami pomiarów realizowanych w trzech kabinach lakierniczych [15]. Zastosowano uproszczenie dotyczących znormalizowanej średnicy kropli lakieru d we mgie lakierniczej. Dystrybuanta średnicy kropli uzależniona jest od kilku parametrów, takich jak rodzaj materiału lakierniczego, rozmiar dyszy pistoletu lakierniczego, ciśnienie powietrza, wielkość strumienia objętości lakieru i odległość od dyszy [19]. Zróznicowany jest również udział czasu lakierowania t_p w całkowitym czasie pracy kabiny lakierniczej t_t .

6. Podsumowanie

Producenci i dostawcy rekuperatorów dla kabin lakierniczych często nie umieszczają w dokumentacji techniczno-ruchowej urządzeń wymogów dotyczących inspekcji i oczyszczania rekuperatorów. Głównym celem opracowywanego modelu sedimentacji drobin mgły lakierniczej jest utworzenie uproszczonej zależności tempa wzrostu osadów od uśrednionych parametrów efektywności transferu TE , efektywności filtra F_E oraz udziału czasu lakierowania t_p w całkowitym czasie pracy kabiny t_t . Na podstawie prezentowanego modelu z uwzględnieniem powyższych parametrów można wstępnie określić czas pracy kabiny lakierniczej, po którym należy przeprowadzić oczyszczanie rekuperatora. Zakładając, że średnia grubość osadu w rekuperatorze nie może przekroczyć wielkości 1mm, to zgodnie z rysunkiem 12 następuje to średnio po czasie $5e6$ sekund. W związku z tym, rekuperator wymaga oczyszczania średnio w odstępach czasu równych 1389 godzin pracy kabiny. Uwzględniając roczny wymiar czasu pracy równy 2000 godzin dla ośmiogodzinnego dnia pracy, oznacza to ośmiomiesięczne odstępy pomiędzy oczyszczaniem rekuperatora. Tempo wzrostu osadów jest niejednolite i przyjmuje indywidualne wartości w różnych kabinach

lakierniczych. Różnice te przedstawiono to w pracy [15]. Ze względów bezpieczeństwa z uwzględnieniem tej rozbieżności, czas pomiędzy inspekcjami rekuperatora nie powinien być krótszy niż 6 miesięcy.

Przedstawiony okres czasu pracy kabiny pomiędzy oczyszczaniem rekuperatora bazuje na uproszczonym i uśrednionym modelu sedymentacji. Dotyczy to między innymi dystrybucji średnicy kropeł lakieru w zależności od właściwości stosowanego materiału lakierniczego, pistoletu lakierniczego oraz odległości od dyszy [19]. Dla indywidualnego przypadku analizy wymaga efektywność stosowanego w kabynie filtra F_E w zależności o średnicy drobin [7] statystyki czasu pracy kabiny w trybie lakierowania, czasu pracy pistoletu lakierniczego oraz wolumenu objętości strumienia aplikowanych lakierów. Powyższy model sedymentacji umożliwia również predykcję stanu zanieczyszczenia rekuperatora na podstawie wolumenu objętości zużytego materiału lakierniczego V_p wewnątrz kabiny lakierniczej.

Literatura:

1. Adamkiewicz A, Valishin A. Discussion and studies of the properties of a cooling water additive preventing erosive wear of cooled surfaces of ship diesel engines. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16 (4): 565–570.
2. Agbangla G. C., Climent E., Bacchin P. Numerical investigation of channel blockage by flowing microparticles. *Computers & Fluids* 2014; 94: 69-83, DOI:10.1016/j.compfluid.2014.01.018.
3. Caruyer C., Minier JP., Guingo M., Henry C. A Stochastic Model for Particle Deposition in Turbulent Flows and Clogging Effects. In: Gourbesville P., Cunge J., Caignaert G. (eds) *Advances in Hydroinformatics*. Springer Water. Springer, Singapore 2016: 597-612l.
4. Chan TL, D'Arcy JB, Schreck R.M. High-solids paint overspray aerosols in a spray painting booth: particle size analysis and scrubber efficiency. *American Industrial Hygiene Association Journal* 1986; 47 (7): 411-417.
5. Chibbaro, S., & Minier, J.-P. Langevin PDF simulation of particle deposition in a turbulent pipe flow. *Journal of Aerosol Science* 2008; 39 (7): 55-571. doi: 10.1016/j.jaerosci.2008.03.002.
6. Darvin C. H. Fractional penetration of paint overspray arrestors. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-97/011 (NTIS PB97-147953), 1997.
7. Darvin C. H., Cox L. S. & Smith D., Comparative Study of Spray Booth Filter System Efficiency, *Journal of the Air & Waste Management Association* 1999; 49 (3): 339-344.
8. Gao W, Zhang Z, Ji H, Zhou j, Liu Q. Optimal quasi-periodic preventive maintenance policies for a repairable system with stochastic maintenance interval. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2015; 17 (3): 389–397, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2015.3.9>.
9. Guler H., Zhu H., Ozkan E., Peter Ling P., Characterization of Hydraulic Nozzles for Droplet Size and Spray Coverage, *Atomization and Sprays* 2012, 22 (8): 627–645.
10. Howarth J. L., Anand S. C., Design, development and characterization of a novel and innovative exhaust filter media for the global automotive industry, *Textile Research Journal* 2015; 86 (18): 1962-1972, DOI: 10.1177/0040517515619349.
11. Kecskésné Nagy E., Koszel M., Sztachó-Pekáry I., Effect of working parameters and nozzle wear rate onto the spray quality in use of different fan flat nozzle, *Journal of Central European Agriculture*, 2014; 15(1): 160-174.
12. Kim H. T., Jung C. H., Oh S. N., and Lee K. W., Particle Removal Efficiency of Gravitational Wet Scrubber Considering Diffusion, Interception, and Impaction, *Journal of Environmental Engineering Science*, Vol. 18, 125:136.

13. Lee C., Kim D. H., Koo J. Y., Overspray Characteristics and Droplet Density Distribution of Low Pressure Shear Coaxial Injector, ICLASS 2012, 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Heidelberg, Germany, September 2-6, 2012.
14. Nikończuk P., Study of Heat Recovery in Spray Booths, *Metal Finishing* 2013; 111 (6): 37-39.
15. Nikończuk P., Preliminary analysis of heat recovery efficiency decrease in paint spray booths, *Transactions of the Institute of Metal Finishing* 2014; 92 (5): 235-237.
16. Pietrowicz S. Przejmowanie ciepła przy wymuszonym opływie wzdłuż płaskiej płyty, *Laboratorium komputerowe z wybranych zagadnień mechaniki płynów*, http://fluid.itcmp.pwr.wroc.pl/~znmp/dydaktyka/wzzmp/Warstwa_przyscienna_cw_7.pdf (16.03.2017).
17. Pilch R., Szybka J., Broniec Z. Determining of hot water-pipe exploitation time on the basis of limiting states. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 14 (3): 203-207.
18. Poozesh S., Akafuah N., Saito K., Effects of automotive paint spray technology on the paint transfer efficiency – a review *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 2017, 232 (2): 282-301 <https://doi.org/10.1177/0954407017695159>
19. Salaimah A., Adornato A., Akafuah N., Saito K., Assessment of Spray Envelope Using Droplet Breakup Regime and Mechanisms, ICLASS 2015, 13th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Tainan, Taiwan, August 23-2 2015.
20. Schweizer R., Technological Advancements in Overspray Collectors, *Metal Finishing* 2010; 108 (4): 38-45.
21. Singh SSK, Abdullah S, Mohamed NAN. Reliability analysis and prediction for time to failure distribution of an automobile crankshaft, *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2015; 17 (3): 408–415, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2015.3.11>.
22. Snowden-Swan L. Transfer Efficiency and VOC Emissions of Spray Gun and Coating Technologies in Wood Finishing, Pacific Northwest Pollution Prevention Research Center 1992.
23. Stępień Z. A study of factors influencing the formation of harmful deposits in the diesel engine injectors. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2017; 19 (3): 331–337, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2017.3.3>.
24. Wiechuła B. M. The assessment of explosion risk in cabins during spraying coating powder. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2005; 7 (25): 3-15.
25. Wright S. R., Bond J. H., Hazardous waste Minimization of paint overspray via medialess dynamic particle filtration, Final Report INNOVATECH, INC, 25 Apr 97 -25 Jan 98.
26. Best Practice Guidelines for Vehicle Refinishing Issued to support European Union (Paints, Varnishes, Vehicle Refinishing Products and Activities), Regulations Environmental Protection Agency Office of Environmental Enforcement (OEE), 2012.
27. Isocyanate paint spraying, Safely managing spray booths and rooms. <http://www.hse.gov.uk/pUbns/priced/hsg276.pdf> (03.03.2018).
28. Archive of Techniki Systemów Aplikacyjnych Sp. z o.o.
29. <http://www.pandaspraybooth.com/pdf/filterInfo.pdf> (16.03.2017).
30. http://www.prowest.pl/cms/uploads/Filtry_katalog.pdf (16.03.2017).