

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: Jacek Stelmach

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

1) mgr inż., 1986 r. Politechnika Łódzka, Instytut Inżynierii Chemicznej (na prawach wydziału)

tytuł pracy magisterskiej: Wnikanie masy w układzie napowietrzanym z mieszaniem mechanicznym

2) dr nt., 2000, Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

tytuł rozprawy doktorskiej: Badania pracy samozasysającego mieszadła tarczowego

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1986 do chwili obecnej specjalista chemik, asystent, adiunkt,

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska,
Politechnika Łódzka

4. Wskazane osiągnięcia naukowe

a) Tytuł: Hydrodynamika układu dwufazowego ciecz-gaz w mieszalniku -
Wykorzystanie metod fotooptycznych

b) Autor: Jacek Stelmach, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, seria Monografie
Politechniki Łódzkiej (2014), ISBN 978-83-7283-597-0

c) Omówienie celu naukowego pracy i osiągniętych wyników

Celem pracy było określenie warunków hydrodynamicznych (tj. prędkości faz w mieszalniku podczas mieszania układów jedno- i dwufazowych) oraz określenie rozmiarów pęcherzyków różnymi metodami fotooptycznymi. Przeprowadzono również analizę stosowalności i użyteczności różnych metod pomiarowych wykorzystujących zjawiska fotooptyczne do wymienionych celów. Ograniczono się do metod stosowanych i sprawdzonych w badaniach prowadzonych w Katedrze Aparatury Procesowej Politechniki Łódzkiej.

Metody fotooptyczne wymagają użycia przezroczystego ośrodka. Badania przeprowadzono w szklanym płaskodennym zbiorniku o średnicy 292 mm. Najczęściej w badaniach używano wody destylowanej lub roztworu NaCl o stężeniu 0,1 mol/dm³. Większość badań przeprowadzono z użyciem samozasysającego mieszadła tarczowego o średnicach 100, 125 i 150 mm. Mieszadło tego typu dysperguje gaz w cieczy bez konieczności stosowania instalacji ze sprężonym gazem. Pomiary prędkości wykonano używając:

- układu pomiarowego LDA firmy Dantec,
- układu PIV firmy LaVision z laserem dwuimpulsowym Nd:YAG,

- szybkich kamer video firmy RedLake filmujących ruch znaczników przepływu oraz pęcherzyków gazu z prędkością do 500 kl/s.

Fotografie pęcherzyków gazu były wykonywane aparatami analogowym (Praktica MTL5, Exakta RTL1000, Canon EOS 50E) i cyfrowymi (Canon EOS 20D i EOS 5D Mk II). Fotografie analogowe skanowano używając skanera Epson Perfection 3200 PHOTO.

Oświetlenie wnętrza zbiornika zapewniały oświetlacze halogenowe lub lampy błyskowe (Metz 40 MZ 3i, Canon Speedlite EX580 II). W celu oświetlenia tylko wybranej części mieszalnika stosowano tunele świetlne własnej konstrukcji.

W pracy wykorzystano opublikowane i nieopublikowane wyniki badań własnych oraz literaturę przedmiotu związaną z tematyką pracy. W miarę możliwości starano się zawrzeć w pracy uwagi praktyczne, które bardzo rzadko są publikowane.

W ostatnich dziesięcioleciach XX wieku nastąpił szybki rozwój nieinwazyjnych metod pomiaru prędkości płynów [1], w których zastosowano oświetlacze laserowe. Drugim, nie mniej ważnym, czynnikiem rozwoju tych metod był rozwój komputerów i technik obliczeniowych. Metoda LDA (Laser Doppler Anemometry) pozwala na określanie w szerokim zakresie chwilowych prędkości płynu w bardzo małej objętości pomiarowej [2]. Z kolei metoda PIV (Particle Image Velocimetry) pozwala na jednoczesne określanie prędkości chwilowych płynu w wielu punktach leżących w jednej płaszczyźnie [3]. Obie metody wymagają dodania do płynu cząstek traseira, które poruszają się z prędkością płynu i odbijają światło (w rzeczywistości obie metody określają prędkość cząstek traseira [1,4]). Odbicie światła ma miejsce również na powierzchni międzyfazowej. Dzięki temu można rejestrować obrazy pęcherzyków, ale duża liczba pęcherzyków gazu utrudnia pomiary metodami fotooptycznymi ze względu na rozpraszanie światła i przesłanianie cząstek traseira. Powoduje to, że dla zatrzymania fazy gazowej większego od 4% wiarygodność pomiarów ulega znacznemu zmniejszeniu. Stanowi to poważne ograniczenie omawianych metod. Przy mniejszym zatrzymaniu fazy gazowej dobre rezultaty osiąga się z użyciem znaczników fluorescencyjnych (np. zawierających rodaminę). Ponieważ długości fali emitowanej przez barwnik fluorescencyjny jest różna długości fali światła emitowanego przez laser to po zastosowaniu filtra optycznego pęcherzyki gazu przestają być widoczne na zdjęciach. Zastosowanie dwóch zsynchronizowanych kamer z filtrami optycznymi pozwala na jednoczesną rejestrację ruchu znaczników (cieczy) jak i pęcherzyków gazu [5].

Różnica między metodami LDA i PIV sprowadza się również do częstotliwości określania prędkości chwilowych (kilkanaście herców w metodzie PIV wobec kilku kiloherców w metodzie LDA). Ze względu na czas pomiaru, wielkość pamięci masowej oraz czas obliczeń w metodzie PIV ograniczona jest również liczba pomiarów prędkości chwilowych (zwykle kilkaset, podczas gdy w metodzie LDA bez trudu osiąga się kilkadziesiąt tysięcy próbkowań). Wymienione różnice mogą wpływać na uśrednione w czasie wartości prędkości i pulsacji prędkości. W trakcie badań porównawczych stwierdzono, że największe rozbieżności występują, gdy w polu pomiarowym używanym w metodzie PIV występują duże różnice prędkości chwilowych (jak ma to miejsce w przypadku prędkości obwodowych w pobliżu końca łopatkii mieszadła i przy ścianie mieszalnika na poziomie mieszadła). Potwierdzono, że zgodnie z informacjami literaturowymi optymalną wielkością pola pomiarowego w metodzie PIV jest 32 px x 32 px [6,7]. Stwierdzono również, że nakładkowanie obszarów pomiarowych pozwala na uzyskanie zwiększenie ilości informacji o zmianach prędkości w płaszczyźnie pomiarowej (noża świetlnego). Ma to

znaczenie przy interpolowaniu danych doświadczalnych. Z przeprowadzonych badań porównawczych wynika, że stosowana wcześniej metoda ze znacznikami przepływu daje wyniki porównywalne z nowoczesnymi metodami pomiarowymi. Jednak interakcje między znacznikami i pęcherzykami gazu uniemożliwiają jej stosowanie w układzie dwufazowym.

Wpływ gazu z otworów mieszadła

Użycie mieszadła samozasysającego zbudowanego ze szkła organicznego (plexiglasu) umożliwiło obserwację zjawisk zachodzących wewnątrz mieszadła podczas zwiększania jego częstości obrotowej. Stwierdzono, że siła odśrodkowa wpływa na kształt pęcherza gazowego wewnątrz mieszadła [8]. Jednak najważniejszą siłą napędową powodującą wypływ gazu z otworów mieszadła jest podciśnienie powstające za poruszającą się łopatką. W związku z tym w równaniach korelacyjnych dla mieszadeł samozasysających ważną liczbą kryterialną jest zmodyfikowana liczba Froude'a Fr' [9]. Zawiera ona trzy ważne parametry procesowe: średnicę mieszadła, częstość obrotową mieszadła (można określić prędkość łopatki) oraz wysokość cieczy nad mieszadłem (można obliczyć ciśnienie hydrostatyczne). Dyspergowanie gazu rozpoczyna się gdy wartość Fr' przekroczy wartość krytyczną. Dla omawianego mieszadła wynosi ona $Fr'_{kr}=0,207$ [10]. Wartość ta jest zgodna z informacjami literaturowymi dla mieszadeł o podobnym sposobie działania [11,12].

Na podstawie pomiarów PIV dla ustalonego położenia łopatki względem przegród stwierdzono, że za łopatką mieszadła powstaje kawerna. Wewnątrz kawerny średnia prędkość obwodowa cieczy przekracza prędkość końca łopatki mieszadła [13]. Opływ łopatki mieszadła jest zbliżony do modelu zawróconej strugi [14]. Wewnątrz kawerny występują silne zawirowania cieczy, które powodują rozdrabnianie pęcherzy gazowych oderwanych od powierzchni międzyfazowej [7,15]. Przeanalizowano znalezione w literaturze [16] modele wypływu strumienia gazu do cieczy pod kątem zgodności z obserwacjami wykonanymi dla mieszadła samozasysającego. Stwierdzono, że modele te nie odpowiadają warunkom dyspergowania gazu przez mieszadła samozasysające. Obecna wiedza na temat mechanizmów powstawania pęcherzyków gazu w silnym przepływie krzyżowym jest niewystarczająca do stworzenia pełnego modelu wypływu gazu z otworów wylotowych mieszadła [17].

Prędkości cieczy w układzie jednofazowym

Wykonane metodą LDA (20000 próbkowań - pomiarów prędkości chwilowych) i PIV (100 próbkowań) pozwoliły na porównanie profili prędkości na wysokości mieszadła, gdzie powinny występować największe zmiany prędkości. Poza obszarem mieszadła (w odległości większej od kilkunastu milimetrów od końca łopatki) zgodność profili prędkości średnich wszystkich składowych jest bardzo dobra [18]. W obszarze mieszadła metodą PIV otrzymano mniejsze wartości prędkości średnich niż metodą LDA [18]. Przyczyny mogą być następujące: znaczna różnica liczebności prędkości chwilowych, przyjęcie do określenia przesunięcia znaczników zbyt małej prędkości oraz zmienne położenie łopatki względem przegród w chwili pomiaru. Dalsze badania [13] wykazały, że druga z podanych przyczyn (ze względu na omówione wcześniej występowanie za łopatką prędkości większych od prędkości łopatki) jest decydująca.

Na podstawie wykonanych pomiarów prędkości można stwierdzić, że samozasysające mieszadło tarczowe wywołuje promieniowo-obwodową cyrkulację

cieczy [13,19,20]. Na wysokości mieszadła średnia wartość osiowej składowej prędkości jest równa zeru. W pobliżu ścianki strumień rozdziela się na dwa strumienie cyrkulacji wtórnej: płynący do góry i w dół [13].

Stwierdzono, że profile prędkości na danej wysokości na dnie zbiornika i określonego położenia względem przegród z zadawalającą dokładnością można opisać czteroparametrową zależnością typu hiperbolicznego [21].

Prędkości cieczy w układzie dwufazowym

Obecność fazy gazowej powoduje zmniejszenie średnich prędkości cieczy w porównaniu do układu jednofazowego [22]. Największe różnice występują za łopatką mieszadła i w niewielkiej promieniowej odległości od jej końca. Zwiększanie częstości obrotowej dla danej średnicy mieszadła powoduje rozszerzanie się obszaru zmniejszonych prędkości cieczy w kierunku ścianki mieszalnika. Przy małej liczbie pęcherzyków układ można traktować jak jednofazowy. Potwierdza to czynione wcześniej założenia odnośnie hydrodynamiki mieszadeł samozasysających [23].

Prędkości pęcherzyków gazu w cieczy

Charakter ruchu pęcherzyków gazu jest zgodny z przepływem cieczy w mieszalniku. Pęcherzyki na poziomie mieszadła płyną w kierunku ścianki mieszalnika. Przy ścianie obserwuje większość pęcherzyków płynie ku górze (wspomagana siłą wyporu), natomiast część jest unoszona przez strumień cyrkulacji wtórnej w kierunku dna mieszalnika [13,21]. Przy dostatecznie dużej cyrkulacji cieczy nad mieszadłem część pęcherzyków jest przy wale unoszona w dół, co wydłuża czas kontaktu międzyfazowego. Na poziomie mieszadła prędkości pęcherzyków są około 10 razy mniejsze od prędkości końca łopatki mieszadła [13].

W początkowej fazie samozasysania (gdy wartość Fr' jest o kilka procent większa od krytycznej) zaobserwowano największe prędkości względne cieczy i pęcherzyków gazu. Występują one w pobliżu końca łopatki mieszadła i wynoszą około 0,4 m/s. Zwiększanie częstości obrotowej mieszadła zwiększa liczbę pęcherzyków w kawernie oraz poza nią. Zmniejszeniu ulegają prędkości względne faz przy mieszadle (do około 0,1 m/s), ale zwiększa się prędkość względna faz w pobliżu ścianki mieszalnika.

Pulsacje prędkości w układzie jednofazowym

W przypadku profili średniokwadratowych pulsacji prędkości (w sensie RMS) zgodność wyników jest lepsza niż w przypadku prędkości średnich [13]. Największe różnice również występują w tzw. obszarze mieszadła.

Największe wartości średniokwadratowych pulsacji prędkości występują na poziomie mieszadła w pobliżu końca łopatki [13]. Osiągają tam wartość połowy prędkości końca łopatki. Spadek wartości pulsacji prędkości jest bardzo szybki. Na poziomie mieszadła w odległości około 50 mm od końca łopatki pulsacje mają wartość poniżej 10% prędkości łopatki. Przegrody praktycznie nie wpływają na wartości pulsacji prędkości.

Poza niewielkim obszarem mieszadła składowa obwodowa, promieniowa i osiowa mają w punktach pomiarowych niemal takie same wartości [13]. Można zatem stwierdzić, że w mieszalniku z samozasysającym mieszadłem tarczowym burzliwość jest izotropowa.

Pulsacje prędkości cieczy w układzie dwufazowym

Wprowadzenie niewielkiej ilości gazu (zatrzymanie fazy gazowej 0,4%) tylko minimalnie zmniejsza pulsacje prędkości w stosunku do układu jednofazowego. Jednak przy zatrzymaniu 1,4% w pobliżu mieszadła pulsacje są już dwukrotnie mniejsze niż w czystej cieczy. Następuje tłumienie pulsacji przez fazę gazową. Zjawisko to nasila się przy zwiększaniu zatrzymania fazy gazowej (co w przypadku mieszadła samozasysającego jest równoznaczne ze zwiększeniem częstości obrotowej mieszadła) [13].

Stopień turbulencji

Znajomość średnich wartości prędkości i pulsacji prędkości w punkcie pomiarowym pozwala na określenie stopnia turbulencji. Jest on definiowany jako stosunek średniego kwadratu pulsacji do średniego kwadratu prędkości [24,25]. Okazało się, że dla tak zdefiniowanego stopnia turbulencji w obszarze rozciągającym się od osi mieszadła do ścianki mieszalnika oraz po 30 mm nad i pod mieszadłem wartość stopnia turbulencji wynosi około 1,3 i nie zależy od częstości obrotowej. Wprowadzenie fazy gazowej nieznacznie zmniejsza stopień turbulencji. Największe różnice zaobserwowano dla częstości obrotowych mieszadła większych od 6 s^{-1} . W tych warunkach stopień turbulencji zmniejsza się do wartości około 1,1. Opierając się na znalezionym w literaturze [16] analitycznym sposobie określania stopnia burzliwości obliczono jego wartości dla warunków mieszania. Obliczona wartość maksymalna 1,73 jest większa od zmierzonej.

Szybkość dyssypacji energii

Ważnym parametrem w procesie mieszania jest szybkość dyssypacji energii kinetycznej. Jest on związany z pulsacjami prędkości. Z analizy różnych metod określania szybkości dyssypacji energii [26] wynika, że dobrym sposobem jej obliczania jest użycie prostej zależności opartej o analizę wymiarową [7,27,28]. Wykorzystuje się w niej średniokwadratową pulsację prędkości (w sensie RMS). Dlatego częstość określania prędkości chwilowych nie ma w tym przypadku znaczenia. Stosując sumowanie ilości energii rozpraszanej w elementach o znanej objętości określono wartość współczynnika liczbowego w omawianym równaniu. Wynosi ona około $C=1$ przy założeniu, że charakterystycznym wymiarem liniowym jest średnica mieszadła [29,30]. Ten wymiar jest łatwy do określenia w przeciwieństwie do skali największych wirów w mieszalniku. Stwierdzono, że wartość współczynnika zmniejsza się ze wzrostem częstości obrotowej mieszadła [31]. W przypadku pomiarów PIV wartość współczynnika liczbowego można obliczać z zależności uwzględniającej średnicę mieszadła, odległość między wektorami prędkości i średnią skalę Kołmogorowa dla mieszalnika [31].

Traktując wartości szybkości dyssypacji energii obliczone z omówionej zależności jako wartości odniesienia dokonano analizy porównawczej innych metod obliczeniowych dla obu metod pomiarowych, tzn. LDA i PIV. Większość z nich wymagała przepróbkowania sygnału LDA, tak aby odstępy czasowe między analizowanymi wartościami były równe [32-35]. Na podstawie przepróbkowanych sygnałów obliczono gęstości widm energetycznych [36]. Występowanie pików przy częstotliwości odpowiadającej częstotliwości przejść łopatkę przez punkt pomiarowy pozwala na stwierdzenie, że błędy powodowane przepróbkowaniem sygnału są bardzo małe. W otrzymanych widmach energetycznych stwierdzono występowanie zakresu, w którym występuje prostoliniowy zakres o nachyleniu $-5/3$. Pozwala to na obliczenie szybkości dyssypacji energii z tzw. „prawa Kołmogorowa $-5/3$ ”, pod

warunkiem właściwego określenia prędkości odniesienia. Znajomość tej prędkości jest niezbędna, aby z dziedziny częstotliwościowej przejść do dziedziny liczb falowych. W omawianym przypadku dobrą zgodność z wartościami odniesienia uzyskano przyjmując za prędkość odniesienia $1/3$ pierwiastka kwadratowego z sumy kwadratów średnich prędkości składowych. Niestety nie odpowiada to opisanym w literaturze definicjom prędkości odniesienia [37]. Dobrą zgodność z wartościami odniesienia uzyskano używając w obliczeniach jednostkowej energii kinetycznej i całkowitej skali czasowej. Główną trudność w tej metodzie stanowi obliczenie wartości skali czasowej na podstawie wartości funkcji autokorelacji. Stwierdzono, że najlepsze rezultaty otrzymuje się całkując do pierwszego przecięcia autokorelogramu z osią odciętych oraz stosowanie uśredniania blokowego [38]. Metoda ta wymaga określenia wartości współczynnika liczbowego. Jego wartość dla badanego mieszała zawiera się w przedziale od $1/9$ do $1/6$.

W przypadku danych z metody PIV istnieje możliwość użycia w obliczeniach równania definicyjnego [39,40,41]. Wymaga to zmierzenia wszystkich składowych prędkości lub założeń upraszczających, np. założenia izotropowości burzliwości (jak wspomniano ten warunek jest spełniony). Ponadto okazuje się, że stosowalność tej metody wymaga odległości między wektorami prędkości zbliżonej do liniowej skali Kołmogorowa [39,42]. Dla używanego sprzętu odległość ta jest przynajmniej kilkanaście razy większa od tej skali. Dlatego wprowadzono modyfikacje równania definicyjnego oparte na modelach burzliwości. Dobre rezultaty daje użycie modelu Smagorinskiego [43,44]. Obliczenia wykonane z wykorzystaniem modelu Smagorinskiego (z wartością stałej $C_s=0,11$) wykazują, że największe różnice w stosunku do wartości odniesienia występują w przestrzeni w pobliżu mieszała [13]. W tym obszarze nie jest spełnione założenie izotropowości burzliwości. Jest to najprawdopodobniej podstawowa przyczyna rozbieżności wyników.

Przestrzeń, w której występują największe szybkości dyssypacji energii odpowiada opisanej wcześniej kawernie za łopatką mieszała [13]. Powoduje to, że w niewielkiej przestrzeni w pobliżu mieszała (stanowiącej ok. 5% objętości mieszanej cieczy) rozpraszane jest około $2/3$ energii dostarczanej do mieszalnika.

Ze względu na silne rozpraszanie światła na powierzchni międzyfazowej nie wykonano metodą PIV pomiarów na wysokości ponad 90 mm nad dnem zbiornika. Dlatego nie jest możliwe, tak jak dla układu jednofazowego, zsumowanie energii rozpraszanej w objętościach kontrolnych i porównanie jej ze średnią jednostkową mocą mieszania. Pomiarы wykonane poniżej tej wysokości wykazały, że obecność fazy gazowej zmniejsza szybkość dyssypacji energii w układzie pomiarowym. Energia wirów większych od rozmiarów pęcherzyków powoduje ich przesuwanie, natomiast wiry mniejsze, ale mające energię większą od energii powierzchniowej pęcherzyków, mogą powodować ich rozbijanie na mniejsze [45].

Rozmiary pęcherzyków gazu

Jak powiedziano wcześniej, w przypadku mieszała samozasysających pęcherzyki gazu wypływające z otworów wylotowych są rozdrabniane przez wiry o rozmiarach zbliżonych do rozmiarów pęcherzyków. Użycie metod fotooptycznych i oprogramowania do analizy obrazu umożliwiła określanie rozkładów wielkości pęcherzyków dla różnych częstości obrotowych mieszała [46]. Przy niewielkiej liczbie pęcherzyków (mała wartość zatrzymania fazy gazowej) dobre rezultaty uzyskano stosując binaryzację obrazu (przekształcenie do czerni i bieli z określoną wartością progową) i przekształcenia morfologiczne (erozja, dylatacja) do zamykania otwartych konturów [47]. W początkowej fazie samozasysania kształty pęcherzyków

są niemal kuliste, a rozkład wielkości można opisać dwuparametrowym równaniem rozkładu logarytmiczno-normalnego [47,48]. Parametry tego rozkładu udało się uzależnić od parametrów procesowych takich jak średnica mieszadła i jego częstość obrotowa. Na tym etapie pracy mieszadła dominują pęcherzyki, których średnice są mniejsze od 0,5 mm. Maksimum gęstości prawdopodobieństwa występuje dla 0,25 mm.

Przy większych zatrzymaniach fazy gazowej pęcherzyki zaczynają się częściowo zasłaniać. Uniemożliwia to wykorzystanie binaryzacji, gdyż nie można odtworzyć kształtu całych pęcherzyków. W celu określenia rozmiarów pęcherzyków dla tych warunków zastosowano transformację Hougha [49,50]. Jej użycie wymaga określenia krawędzi analizowanych obiektów. Analiza literatury i prace własne wykazały, że najlepsze rezultaty uzyskuje się trzyparametrową metodą Canny'ego [51,52]. Pewną wadą tej metody jest znaczny wpływ wartości parametrów na końcowe rezultaty [13,52]. Konieczna staje się wzrokowa analiza otrzymanych wyników i wprowadzanie korekt. Konieczne staje się też rozdzielanie łuków przedstawiających obwód zachodzących na siebie pęcherzyków. Transformacja Hougha daje dobre rezultaty w przypadku obiektów o kształtach zbliżonych do kołowych. Do prawidłowego rozpoznania obiektu kołowego analizowany łuk powinien mieć długość przynajmniej 50% obwodu okręgu. Przyczyną dodatkowych błędów, szczególnie dla małych obiektów, jest rastrowa struktura obrazu - współrzędne analizowanych obiektów są liczbami naturalnymi. Teoretycznie transformację Hougha można zastosować do rozpoznawania obiektów o kształtach eliptycznych [53]. Taka konieczność ma miejsce w przypadku pęcherzyków o rozmiarach kilku milimetrów, których kształty mogą znacznie odbiegać od kulistych. Wysiłek obliczeniowy oraz wymagania co do pamięci operacyjnej przechowującej tablicę akumulatora są duże, co sprawia, że metoda ta jest nieekonomiczna dla kształtów eliptycznych. Rozwiązaniem w tym przypadku jest użycie metody najmniejszych kwadratów z zastosowaniem rachunku macierzowego [54,55]. Również i w tym przypadku dokładność metody silnie zależy od długości łuku i jego wypukłości. Stwierdzono też duży wpływ parametrów obrazu takich jak głębina ostrości i ostrość konturowa na otrzymywane rezultaty [13].

Częściej, zamiast określania rozkładów wielkości pęcherzyków, używa się objętościowo-powierzchniowej średnicy zastępczej (Sautera). Jej wartość jest obliczana na podstawie analizy obserwowanej populacji pęcherzyków. Dla ustalonych simpleksów geometrycznych zbiornik-mieszadło zaobserwowano około dwukrotny wzrost wartości średnicy Sautera (od 0,6 mm do 1,2 mm) przy zwiększaniu częstości obrotowej mieszadła. Jest to zjawisko odwrotne do obserwowanego podczas mieszania z napowietrzaniem bełkotkowym pod mieszadło. Jednak, jak potwierdzają wykonane zdjęcia, w przypadku mieszadeł samozasysających łopatki nie rozbijają mechanicznie pęcherzyków gazu. Działanie takie mogłyby mieć łopatki nieruchomego statora na zewnątrz mieszadła. Nie przeprowadzono jednak prób w takim układzie.

Porównując obrazy pęcherzyków w wodzie i elektrolicie dla tych samych parametrów procesowych potwierdzono informacje literaturowe, że rozmiary pęcherzyków w elektrolitach są mniejsze niż w wodzie [56].

Zależność współczynnika wnikania masy od hydrodynamiki układu

W trakcie badań samozasysającego mieszadła tarczowego w różnych punktach mieszalnika określono metodą dynamiczną wartości objętościowego współczynnika wnikania masy k_{La} [57,58] i metodą elektrochemiczną wartości współczynnika

wnikania masy k_L [23, 59]. W przypadku k_{La} otrzymano bardzo dobrą zgodność wartości uśrednionych dla całego mieszalnika z danymi literaturowymi [60] dla mieszadeł samozasysających. Porównując otrzymane doświadczalnie wartości współczynnika wnikania masy z wartościami obliczonymi na podstawie różnych modeli wnikania masy można stwierdzić, że w przypadku samozasysającego mieszadła tarczowego dyspergującego gaz w elektrolicie mamy do czynienia z obszarem przejściowym pomiędzy małymi, „nieodkształcalnymi” pęcherzykami (model Fröslinga [9,61]) a większymi pęcherzykami, których powierzchnia ulega deformacji podczas ruchu w cieczy (model Higbie’go [62]). Dobrą zgodność rozkładów wartości k_L w mieszalniku z wartościami obliczonymi uzyskano stosując zależność współczynnika wnikania masy od szybkości dyssypacji energii [63,64].

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (artystycznych)

Studia wyższe ukończyłem w Instytucie Inżynierii Chemicznej (na prawach wydziału) Politechniki Łódzkiej. W dniu 11 września 1986 roku obroniłem, wykonaną pod kierunkiem dra Edwarda Rzyckiego, pracę magisterską na temat „Wnikanie masy w układzie napowietrzanym z mieszaniem mechanicznym”. Była to praca doświadczalna dotycząca wpływu budowy mieszadła turbinowo-tarczowego oraz statora na efektywność procesu wnikania tlenu podczas mieszania mechanicznego.

12 września 1986 roku rozpocząłem pracę w Instytucie Inżynierii Chemicznej PŁ w Zakładzie Aparatury Chemicznej kierowanym przez prof. dr hab. inż. Henryka Błasińskiego. Pracowałem na stanowisku specjalisty chemika, a w roku 1987 odbyłem służbę wojskową. Prowadziłem badania nowych konstrukcji mieszadeł pracujących w napowietrzanych zawieszinach biologicznych. Badania dotyczyły m.in. efektywności procesu wnikania masy, a ich wyniki były publikowane i prezentowane na konferencjach naukowych [65-68]. W lutym 1993 przeszedłem na stanowisko asystenta na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska PŁ. W kontynuowanych badaniach skupiłem się na mieszadłach samozasysających. Wyniki tych badań były prezentowane na konferencjach naukowych (Mieszanie, Przepływy Wielofazowe, Inżynieria Chemiczna i Procesowa) i publikowane w czasopiśmie naukowych [69-89]. Podsumowaniem tych badań stała się rozprawa doktorska na temat „Badania pracy samozasysającego mieszadła tarczowego” [10]. Promotorem był dr hab. inż. Czesław Kuncewicz, natomiast recenzentami prof. dr hab. inż. Andrzej Heim z Politechniki Łódzkiej oraz dr hab. inż. Jerzy Kamieński z Politechniki Krakowskiej. Od października 2001, po odbyciu praktyki przemysłowej, jestem zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Aparatury procesowej PL.

Początek XXI wieku jest czasem szybkiego rozwoju cyfrowych technik rejestracji obrazu. Użycie aparatów cyfrowych ułatwia i przyspiesza proces analizy obrazu związanej np. z określaniem rozmiarów pęcherzyków gazu w mieszanej cieczy. W tym czasie Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska zakupił systemy LDA i PIV. Ich wykorzystanie umożliwiło pomiary prędkości cieczy oraz pęcherzyków gazu w różnych miejscach mieszalnika. Znajomość zmian prędkości cieczy w czasie pomiaru umożliwia określenie szybkości dyssypacji energii w punkcie pomiarowym. Dla mieszadeł samozasysających jest to parametr decydujący o wielkości pęcherzyków gazu, gdyż łopatkę mieszadła nie rozdrabniają mechanicznie strumienia gazu wypływającego z otworów. Zagadnienia związane z rozmiarami pęcherzyków oraz szybkością dyssypacji energii stały się tematami wiodącymi dalszych prac badawczych. W latach 2001-2004 byłem kierownikiem grantu KBN n.t. „Optymalizacja pracy samozasysającego mieszadła tarczowego”. W ramach projektu wykonano m.in. pomiary objętościowego współczynnika wnikania masy, prędkości

cieczy oraz wielkości pęcherzyków gazu. [15,19,20,25,29,30,35,36,90-101]. Badania o wspomnianej tematyce były kontynuowane w ramach działalności statutowej Katedry Aparatury Procesowej PŁ oraz realizowanego w latach 2008-2011 grantu „Badanie układów mieszających do zawiesin biologicznych podczas napowietrzania” (N N208 097735). Rezultaty prac były prezentowane na konferencjach naukowych i publikowane [18,21,22,26,31,37,38,57,58,102-123]. W ostatnich latach współpracowałem z Katedrą Inżynierii Bioprocessowej PŁ. Wynikiem tej współpracy jest kilka publikacji [124-128].

6. Działalność dydaktyczno-wychowawcza i organizacyjna

W ramach pracy dydaktycznej prowadziłem lub prowadzę różne formy zajęć (wykłady, ćwiczenia, projektowanie, laboratoria) z przedmiotów takich jak: Aparatura biotechnologiczna, Aparatura przemysłowa, Procesy mechaniczne, Grafika inżynierska i Rysunek techniczny.

Jestem promotorem niemal 60 prac inżynierskich i magisterskich.

W roku 2008 byłem członkiem komitetu organizacyjnego *XI Ogólnopolskiego Seminarium **MIESZANIE***, które odbywało się przy współudziale Komitetu Inżynierii Chemicznej i Procesowej **Polskiej Akademii Nauk** oraz Polskiego Towarzystwa Inżynierii i Techniki Przetwórstwa Spożywczego **SPOMASZ**. Celem seminarium jest prezentowanie prac badawczych i wdrożeniowych z dziedziny mieszania różnych układów (ciecze, materiały ziarniste, układy wielofazowe).

W latach 1997-2013 wchodziłem w skład komitetów organizacyjnych *Ogólnopolskich Konferencji **OPERACJE MECHANICZNE INŻYNIERII PROCESOWEJ***, których współorganizatorem był Komitet Inżynierii Chemicznej i Procesowej **Polskiej Akademii Nauk**. Na konferencjach prezentowano wyniki badań dotyczących operacji mechanicznych z udziałem ciała stałego. Celem konferencji jest stworzenie wspólnego ogólnopolskiego forum, które umożliwia spotkanie i wymianę doświadczeń wszystkich osób zainteresowanych tą właśnie tematyką.

W ostatnich latach uczestniczyłem w pracach komisji oceniających prace prezentowane na *Seminarium Uczniowsko-Studentckim **PROBLEMY OCHRONY ŚRODOWISKA*** organizowanym przez Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska. Seminarium to jest poświęcone tematyce związanej z problematyką szeroko pojętej ochrony środowiska. Rozmowy odbywane z uczniami i nauczycielami w trakcie seminarium pozwalają propagować nowoczesne formy kształtowania i ochrony środowiska.

Umowa o współpracy między Wydziałem Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska PŁ a Wydziałem Mechanicznym Czeskiego Uniwersytetu Technicznego w Pradze pozwoliła nawiązać kontakty z Katedrą Inżynierii Procesowej w zakresie badań procesu mieszania. Efektem współpracy jest kilka wspólnych publikacji [29,36,86,96,97,122].

Od 1996 roku jestem członkiem Związku Polskich Fotografów Przyrody. Moje prace były prezentowane na wystawach zbiorowych organizowanych lub współorganizowanych przez Okręg Łódzki ZPFP (np. w ramach Festiwalu Filmów przyrodniczych im. Włodzimierza Puchalskiego). Tematyka tych prac to przede wszystkim makrofotografia owadów i kwiatów. W ramach comiesięcznych spotkań członków okręgu odbywają się dyskusje dotyczące różnych technik fotograficznych oraz możliwości sprzętowych. W ramach tych dyskusji prezentowałem wyniki uzyskiwane w fotografii technicznej (wykorzystane w niniejszym referacie oraz

dotyczące innych dziedzin nauki, np. dokumentację rozciągania płaskiej próbki metalowej).

7. Nagrody i odznaczenia

Za osiągnięcia w pracy zawodowej byłem nagradzany przez Dziekana Wydziału Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska.

W 2011 roku zostałem odznaczony przez Prezydenta RP Medalem Srebrnym za Długoletnią Służbę.

8. Podsumowanie dorobku naukowo-badawczego

Jestem autorem, bądź współautorem 66 publikacji w czasopismach krajowych, zagranicznych i materiałach konferencyjnych, (w tym 14 w czasopismach z listy filadelfijskiej) oraz 71 prezentacji na konferencjach naukowych.

- Sumaryczny IF=6,192

- Cytowania: w bazie Web of Science (CRS) zacytowano 18 prac 28 razy, w bazie Scopus dla 19 prac znaleziono 30 cytowań

- Indeks Hirscha: 3 (ISI Web of Science)

9. Literatura cytowana w autoreferacie

1. Mavros P. *Flow visualization in stirred vessels. A review of experimental techniques*, Trans. IChemE, 79, Part A, 2001.
2. <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1046>, dostęp 9.09.2014.
3. <http://www.lavision.de/en/techniques/piv.php>, dostęp 9.09.2014.
4. Raffel M., Willert C., Wereley S., Kompenhans J., *Particle image velocimetry. A practical guide*, Springer-Verlag, Berlin, 2007.
5. Deen N.G., Westerweel J., Delnoij E., *Two-phase PIV in bubbly flows: status and trends*, Chemical Engineering and Technology, 25, s.97-101, 2002.
6. Lavoie P., Avallone G., De Gregorio F., Romano G.P., Antonia R.A., *Spatial resolution of PIV for the measurement of turbulence*, Experiments in Fluids, 43, s.39-51, 2007.
7. Paul E.L., Atiemoto-Obeng V.A., Kresta S.M., *Handbook of industrial mixing. Science and practice*, John Wiley & sons, Hoboken, 2004.
8. Stelmach J., *Powierzchnia międzyfazowa wewnątrz samozasysającego mieszadła tarczowego*, Chemik - nauka - technika - rynek (suplement), 6, s.278, 2009.
9. Zlokarnik M., *Stirring. Theory and practice*, Wiley-VCH, Weinheim, 2001.
10. Stelmach J., *Badanie pracy samozasysającego mieszadła tarczowego*, Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 2000.
11. Poncin S., Nguyen C., Midoux N., Breysse J., *Hydrodynamics and volumetric gas-liquid mass transfer coefficient of a stirred vessel equipped with a gas-inducing impeller*, Chemical Engineering Science, 57, s.3299-3306, 2002.
12. Ju. F., Cheng Z.-M., Chen J.-H., Chu X.-H., *A novel design for a gas-inducing impeller at the lowest critical speed*, Chemical Engineering Research & Design, 87, s.1069-1074, 2009.
13. Stelmach J., *Hydrodynamika układu dwufazowego ciecz-gaz w mieszalniku - Wykorzystanie metod fotooptycznych*, Monografie Politechniki Łódzkiej, Łódź 2014.
14. Гуревич М.И., *Теория струй идеальной жидкости*, Наука, Москва, 1979.

15. Stelmach J., Rzyński E., *Wpływ pęcherzyków gazu z mieszadła samozasysającego*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 42 (34), 5s, s.192-194, 2003.
16. Абрамович Г.Н., *Теория турбулентных струй*, Наука, Москва, 1984.
17. Forrester S.E., *Hydrodynamics of gas-inducing impeller*, PhD thesis, University of Cambridge, 1995.
18. Heim A., Stelmach J., *Porównanie prędkości na wysokości samozasysającego mieszadła tarczowego*, Przemysł Chemiczny, 90(9), s.1642-1646, 2011.
19. Stelmach J., Rzyński E., Heim A., *Rozkłady prędkości średnich na wysokości samozasysającego mieszadła tarczowego*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 41 (33), 4s, s.115-117, 2002.
20. Kurasiński T., Stelmach J., Kuncewicz Cz., *Prędkości cieczy w mieszalniku. Analiza danych*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 43 (35), 3s, s.89-91, 2004.
21. Stelmach J., Kuncewicz Cz., Kamionowska U., *Prędkości obwodowe i promieniowe na wysokości samozasysającego mieszadła tarczowego*, Materiały XII Ogólnopolskiego Seminarium MIESZANIE, Szczecin-Międzyzdroje, s.193-199, 2011.
22. Stelmach J., Kuncewicz Cz., *Prędkości cieczy i pęcherzyków gazu na wysokości samozasysającego mieszadła tarczowego*, Przemysł Chemiczny, 90(9), s.1680-1685, 2011.
23. Kurasiński T., *Wpływ parametrów pola turbulentnego na szybkość transportu masy dla mieszadeł samozasysających*, Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 2007.
24. Plion P., Costes J., Couderc J.P., *Materiały 5th European Conference on MIXING*, Würzburg 1985.
25. Stelmach J., Kuncewicz Cz., Rzyński E., *Stopień burzliwości cieczy w mieszalniku z mieszadłem tarczowym*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 41 (33), 4s, 2002.
26. Stelmach J., Kurasiński T., Kuncewicz Cz., *Analiza porównawcza wybranych metod obliczania szybkości dyssypacji energii*, Inżynieria Chemiczna i Procesowa, 26, s.201-215, 2005.
27. Kresta S.M., Wood P.E., *The flow field produced by a pitched blade turbine: characterization of the turbulence and estimation of the dissipation rate*, Chemical Engineering Science, v.48, n.10, s.1761-, 1993.
28. Ståhl Wernerson E., *Some Fluid Dynamic Characteristics in the Scale-up of Rushton Turbine-Agitated Tanks*. Praca doktorska, Lund, 1997.
29. Stelmach J., Rzyński E., Rieger F., *Szybkość dyssypacji energii dla mieszadła tarczowego*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 42, 3s, s.143-, 2003.
30. Stelmach J., Rzyński E., Kania A., *Energy dissipation on the level of a self-aspirating disk impeller*, Mat. 11th European. Conference on Mixing, Bamberg, Niemcy, P19, s.405-, 2003.
31. Stelmach J., Kuncewicz Cz., *Analysis of methods for measuring energy dissipation rates in the tank with the use of a PIV system*, Materiały 14th European Conference on Mixing, s.443-448, Warszawa, Polska, 2012.
32. Nobach H., Müller E., Tropea C., *Refined reconstruction techniques for LDA data analysis*, Materiały 8th International Symposium on Applied of Laser Technique to Fluid Mechanics, Lizbona, Portugalia, 1996.
33. Nobach H., *Processing of stochastic sampled data in Laser Doppler Anemometry*, Materiały 3rd International Workshop on Sampling Theory & Applications.

34. Nobach H., *Local time estimation for the slotted correlation function of randomly sampled LDA data*, Experiments in Fluids, 32, s.337-345, 2002.
35. Stelmach J., Rzycki E., *The application of sample and hold method in the processing of data obtained from a laser Doppler anemometer*, International Journal of Applied Mechanics & Engineering, 5, 4, s.1291-1303, 2000.
36. Stelmach J., Rzycki E., Rieger F., *Widmo energetyczne wirów w zbiorniku z tarczowym mieszadłem samozasysającym*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 42 (34), 3s, s.145-147, 2003.
37. Kurasiński T., Kuncewicz Cz., Stelmach J., *Method of convective velocity determination from dissipative range of energy spectrum*, Chemical and Process Engineering, 33, 1, s.19-29, 2012.
38. Stelmach J., *Autocorrelation function and integral scale in the tank with a self-aspirating disk impeller*, Materiały 12th European Conference on Mixing, s.49-56, Bolonia, Włochy, 2006.
39. Baldi S., Hann D., Yianneskis M., *On the measurements of turbulence energy dissipation in stirred vessels with PIV techniques*, Materiały 10th International Symposium on Applied of Laser Technique to Fluid Mechanics, Lizbona, Portugalia, 2002.
40. Delafosse A., Collignon M.-L., Crine M., Toye D., *Estimation of the turbulent kinetic energy dissipation rate from 2D-PIV measurements in a vessel stirred by an axial Mixel TTP impeller*, Chemical Engineering Science, 66, s.1728-1737, 2011.
41. Saarenrinne P., Piirto M., *Turbulent kinetic energy dissipation rate estimation from PIV vector fields*, Experiments in Fluids, [Supplement], s.S300-S307, 2000.
42. Xu D., Chen J., *Accurate estimate of turbulent dissipation rate using PIV data*, Experimental Thermal and Fluid Science, 44, s.662-672, 2013.
43. Micheletti M., Baldi S., Yeoh S.L., Ducci A., Papadakis G., Lee K.C., Yanneskis M., *On spatial and temporal variations and estimates of energy dissipation in stirred reactors*, Transactions of the Institution of Chemical Engineering, 82, s.1188-1198, 2004.
44. Bartels C., Breuer M., Durst F., *Comparison between Direct Numerical Simulation and $k-\varepsilon$ prediction of the flow in vessel stirred by a Rushton turbine*, Materiały 10th European Conference on Mixing, s.239-246, Delft, Holandia, 2000.
45. Martin M., Montes F.J., Galán M.A., *Influence of impeller type on the bubble breakup proces in stirred tank*, Industrial Engineering and Chemical Research, 47, s.6251-6263, 2008.
46. Vazquez A., Sanchez R.M., Salinas-Rodríguez E., Soria A., Manasseh R., *A look at three measurement techniques for bubble size determination*, Experimental Thermal & Fluid Science, 30, s.49-57, 2005.
47. Stelmach J., *Rozmiary pęcherzyków w początkowej fazie samozasysania*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 45 (37), 6s, s.225-227, 2006.
48. Heim A., Rzycki E., Stelmach J., *Dyspersja pęcherzyków powietrza w mieszalniku z mieszadłem samozasysającym*, Materiały V Ogólnopolskiej Konferencji Przepływów Wielofazowych, Tom I, s.108-111, Gdańsk 1997.
49. Vega-Alvarado L., Taboada B., Galindo E., Corkidi G., *Hough transform based method for air bubbles and oil drops segmentation in dispersions occurring in stirred bioreactors*, Materiały 25th Annual International Conference of the IEE EMBS, Cancun, Meksyk, 2003.

50. Stelmach J., Pietrzykowski M., *Użycie transformacji Hougha do określania rozmiarów pęcherzyków gazu w wodzie*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 48 (40), 6, s.180-181, 2009.
51. Malina W., Smiatacz M., *Cyfrowe przetwarzanie obrazów*, EXIT, Warszawa 2008.
52. Kuncewicz Cz., Stelmach J., *Wykrywanie krawędzi obrazów pęcherzyków*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 48 (40), 6, s.113-114, 2009.
53. Bennett N., Burrridge R., Saito N., *A method to detect and characterize ellipses using the Hough transform*, IEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 21, 7, s.652-657, 1999.
54. Leung M.K.H., Prasad D.K., *Methods for ellipse detection from edge maps of real images*, *Machine Vision - Applications and Systems*, Chapter 7, <http://www.intechopen.com/books/machine-vision-applications-and-systems>, dostęp 4.09.2014.
55. Chaudhuri D., *A simple least squares method for fitting of ellipses and circles depends on border points of a two-tone image and their 3-D extensions*, Pattern Recognition Letters, 31, s.818-829, 2010.
56. Kamieński J., *Wybrane zagadnienia mechanicznego mieszania układów ciecz-gaz*, Monografia 147, Kraków 1993.
57. Kurasiński T., Kuncewicz Cz., Stelmach J., *Lokalne wartości $k_L a$ w mieszalniku dla układu gaz-ciecz*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 44 (36), 5s, s.36-40, 2005.
58. Kurasiński T., Kuncewicz Cz., Stelmach J., *Distribution of values of the volumetric mass transfer coefficient during aeration of liquid using a self-aspirating impeller*, Chemical and Process Engineering, 31, s.505-514, 2010.
59. Stelmach J., *Współczynniki wnikania masy dla mieszań Rushtona i samozasysającego*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 48 (40), 4, s.122-123, 2009.
60. Poncin S., Nguyen C., Midoux N., Breysse J., *Hydrodynamics and volumetric gas-liquid mass transfer coefficient of a stirred equipped with a gas-inducing impeller*, Chem. Eng. Sci., 57, s.3299-3306, 2002.
61. Alves S.S., Maia C.I., Vasconcelos J.M.T., *Gas-liquid mass transfer coefficient in stirred tanks interpreted through bubble contamination kinetics*, Chemical Engineering and Processing, 43, s.823-830, 2004.
62. Linek V., Kordač M., Fujasová M., Moucha T., *Gas-liquid mass transfer coefficient in stirred tanks interpreted through models of idealized eddy structure of turbulence in the bubble vicinity*, Chemical Engineering and Processing, 43, s.1511-1517, 2004.
63. Garcia-Ochoa F., Gomez E., *Theoretical prediction of gas-liquid mass transfer coefficient, specific area and hold-up in sparged stirred tanks*, Chemical Engineering Science, 59, s.2489-2501, 2004.
64. Prasher B.D., Wills G.B., *Mass transfer in agitated vessel*, Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., 12, 3, s.351-354, 1973.
65. Krasławski A., Rzyński E., Stelmach J., *Wybór optymalnego urządzenia mieszająco-napowietrzającego w oparciu o całą rozmytą*, Zesz. Nauk. Politechniki Łódzkiej, Inż. Chem., 567, z. 16, s.93-98, 1989.
66. Krasławski A., Rzyński E., Stelmach J., *Method of multiobjective optimization for imprecise objectives*, Chem. Eng. Technol., 14, 5, s. 363-367, 1991.
67. Krasławski A., Rzyński E., Stelmach J., *Selection of an optimum mixing-aerating device based on fuzzy integral*, Chem. Biochem. Eng. Q., 5, 1-2, s.19-22, 1991.

68. Krasławski A., Rzycki E., Stelmach J., *Application of fuzzy multiobjective optimization for self-sucking impellers in a bioreaktor*, Bioprocess Eng., 6, s.109-116,1991.
69. Heim A., Rzycki E., Stelmach J., *Mieszanie z napowietrzaniem. Mieszadła samozasysające*, Materiały IV Ogólnopolskiej Konferencji Przepływów Wielofazowych, s.114,1994.
70. Heim A., Krasławski A., Rzycki E., Stelmach J., *Aeration of bioreactors by self-aspirating impellers*, Chem. Eng. Journal, 58,s.59-63,1995.
71. Heim A., Rzycki E., Stelmach J., *Mieszanie z napowietrzaniem. Mieszadła samozasysające*, Inż. Apar. Chem., 2, s.20-22,1995.
72. Heim A., Rzycki E., Stelmach J., *Średnice pęcherzyków powietrza w mieszalniku z mieszadłem samozasysającym*, Zesz. Nauk. Płódź Inż. Chem.,779,z. 21, s.109, 1997.
73. Heim A., Rzycki E., Stelmach J., *Dyspersja pęcherzyków powietrza w mieszalniku z mieszadłem samozasysającym*, Materiały V Ogólnopolskiej Konferencji Przepływów Wielofazowych (Gdańsk, 15-17.10), s.108-111, 1997.
74. Heim A., Rzycki E., Stelmach J., *Diameters of air bubbles generated by self-aspirating mixer*, Chem. Biochem. Eng. Q.,11,3, s.143-146, 1997.
75. Heim A., Rzycki E., Stelmach J., *Mieszadła samozasysające. Zatrzymanie fazy gazowej*, Materiały XVI Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Inżynierii Chemicznej i Procesowej (Kraków-Muszyna 22-25.09),t. IV,s.75-78, 1998.
76. Heim A., Rzycki E., Stelmach J., *Mixing power of self-aerating disk-type agitators*, Materiały 13th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA'98" (Praga 23-28.08),,CD.-ROM P1.41, 1998.
77. Heim A., Kuncewicz Cz., Rzycki E., Stelmach J., *Mixing power for self-aerating impellers*, Acta Polytechnica Scandinavica, Chemical Technology Series, no.263, s.1-15, 1999.
78. Kuncewicz Cz., Rzycki E., Stelmach J., *Współczynniki zatrzymania fazy gazowej dla mieszadeł samozasysających tarczowych*, Prace Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej, T. XXV, z.1-2, s.163-166, 1999.
79. Stelmach J., Kuncewicz Cz., *Mieszanie układu dwufazowego gaz-ciecz dla mieszadeł samozasysających*, Prace Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej, T. XXV, z.1-2., s.235-240,1999.
80. Stelmach J., Kuncewicz Cz., *Mixing of a two-phase gas-liquid system for self-aspirating impellers*, Materiały International Conference on "Problems in fluid mechanics and hydrology" (Praga 23-26.06),1,169-179, 1999.
81. Heim A., Kuncewicz Cz., Rzycki E., Stelmach J., *Gas hold-up for self-aspirating impellers*, Applied Mechanics and Engineering, 5,3, s.685-693, 2000.
82. Kuncewicz Cz., Stelmach J., *Optymalny zakres pracy samozasysającego mieszadła tarczowego*, Zesz. Nauk. Płódź Inż. Chem. i Proc., 838,z. 27, s.169-178, 2000.
83. Kuncewicz Cz., Stelmach J., *A self-aspirating disk impeller - an optimization attempt*, Proceedings of 10th European Conference on Mixing (Delft 2-5.07), s.447-454, 2000.
84. Stelmach J., Heim A., Kuncewicz Cz., *Przepływ gazu przez samozasysające mieszadło tarczowe*, Inż. Apar. Chem., 3s, s.132-133, 2000.
85. Stelmach J., Kuncewicz Cz., *Gas hold-up and mass transfer for a self-aspirating disk impeller*, Materiały XII Celostatni Konfernci "Michani, stavba a provoz

- michacich zarizeni, ucpavky a tesneni" (Brno, 9-11.05), CD-ROM, P12, s.1-12, 2000.
86. Stelmach J., Rzycki E., Rieger F., *Rozpraszanie gazu przez samozasysajace mieszadla tarczowe*, Inż. Apar. Chem., 3s, s.134-135, 2000.
 87. Kuncewicz Cz., Stelmach J., *Rozmiary wirów i pęcherzyków dla samozasysajacego mieszadla tarczowego*, Inż. Chem. Proc., 22 ,3C, s.831-836, 2001.
 88. Stelmach J., *Fluktuacje prędkości na wysokości samozasysajacego mieszadla tarczowego*, Inż. Chem. Proc., 22, 3E, s.1315-1320, 2001.
 89. Stelmach J., Kuncewicz Cz., *A comparison of the efficiency of self-aspirating and flat-blade impellers*, Proceedings of 4 th International Symposium on Mixing in Industrial Processes (Toulouse, Francja 14-16.05), CD-ROM s.46, 2001.
 90. Stelmach J., Kuncewicz Cz., Kania A., *Energy dissipation and size of Kolmogoroff eddies for a self-aspirating disk impeller*, Proceedings of 28 th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering (Tatranske Matliare 21-25.05), CD-ROM P 209, 2001.
 91. Rzycki E., Stelmach E., Stelmach J., *Wnikanie masy dla mieszadel samozasysajacych*, Inż. Apar. Chem., 41(33), 3s, s.127-128, 2002.
 92. Rzycki E., Stelmach J., *Fluktuacja prędkości podczas mieszania cieczy nieniu-tonowskiej*, Inż. Apar. Chem., 41(33), 4s, s.113-115, 2002.
 93. Stelmach J., Kuncewicz Cz., Rzycki E., *Angular distribution of tangential velocities on the height of a self-aspirating disk impeller*, Materiały 29th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering (27-31.05 Tatranske Matliare, Slovakia), CD-ROM P 318, s.1-8, 2002.
 94. Stelmach J., Rzycki E., *LDA measurement in the impeller region of stirred vessels: an assessment of measurement technique*, Chem. Biochem. Eng. Q., 16,4, s.173-177, 2002.
 95. Stelmach J., Kuncewicz Cz., Kania A., *Gas bubble size distribution for a self-aspirating disk impeller*, Proceedings of 11th European Conference on Mixing (Bamberg 14-17.10), s.413-420, 2003.
 96. Stelmach J., Rzycki E., Rieger F., *Dispergace plynu v oblasti samonasavaciho michadla*, Materiały XIII Celostatni Konferenc "Michani stavba a provoz michacich zarizeni ucpavky a tesneni" (Brno 8-10.09), CD-ROM, C13, s.1-7, 2003.
 97. Stelmach J., Rzycki E., Rieger F., *Rozmery bublinek na pocatku samonasavani*, Materiały XIII Celostatni Konferenc "Michani stavba a provoz michacich zarizeni ucpavky a tesneni" (Brno 8-10.09), CD-ROM, C14, s.1-9, 2003.
 98. Stelmach J., Rzycki E., Tomalczyk M., *Technika rejestracji obrazu w procesie mieszania układów dwufazowych*, Inż. Apar. Chem., 42(34), 5s, s.195-197, 2003.
 99. Kurasiński T., Stelmach J., *Skale turbulencji i rozmiary pęcherzyków na poczatku samozasysania*, Inż. Chem. Proc., 25,3/2, s.1225-1230, 2004.
 100. Rzycki E., Stelmach J., *Dyspergowanie gazu przez samozasysajace mieszadlo tarczowe*, Czasopismo Techniczne Mechanika, 101,z.4-M, s.231-241, 2004.
 101. Stelmach J., Rzycki E., *Powierzchnia międzyfazowa i wnikanie masy w zbiornikach z samozasysajacym mieszadlem tarczowym*, Inż. Chem. Proc., 25, 3/3, s.1639-1644, 2004.
 102. Kurasiński T., Kuncewicz Cz., Stelmach J., *Porównanie szybkości wnikania masy w wodzie i w ściekach modelowych podczas napowietrzania mieszadłami*

103. Kurasiński T., Stelmach J., Kuncewicz Cz., *Wnikanie masy w cieczy nienewtonowskiej podczas samozasysania*, Inż. Apar. Chem., 44(36), z.5s, s.40-44, 2005.
104. Rzyski E., Stelmach J., *Napowietrzanie masy w cieczach nienewtonowskich podczas samozasysania*, Inż. Apar. Chem., 44(36), z.5s, s.58-62, 2005.
105. Stelmach J., Rzyski E., *Efektywność wnikania masy dla mieszadeł samozasysających*, Inżynieria Rolnicza, 9, s.329-337, 2005.
106. Stelmach J., *Rozmiary pęcherzyków w początkowej fazie samozasysania*, Inż. Apar. Chem., 45(37), 6s, s.225-227, 2006.
107. Stelmach J., *Mieszadło cyrkulacyjne. Moc mieszania i współczynniki wnikania masy*, Inż. Apar. Chem., 45(37), 4s, s.141-143, 2006.
108. Stelmach J., *Efektywność mieszadeł turbinowo-tarczowych z kierownicą*, Przemysł Chemiczny, 85,8-9, s.1150-1153, 2006.
109. Stelmach J., Rzyski E., Heim A., *Operating efficiency of an impeller with coiled rotary paddles*, Inż. Chem. Proc., 27,s.391-402, 2006.
110. Heim A., Stelmach J., *Napowietrzanie powierzchniowe i wgłębne. Próba porównania*, ZN Wydz. Bud. i Inż.. Środowiska, P.Kosz. Nr 23, seria: Inżynieria Środowiska, s.291-303, 2007.
111. Stelmach J., *Rozkłady wielkości pęcherzyków gazu w początkowej fazie samozasysania*, Inż. Apar. Chem., 4-5, s.117-119, 2007.
112. Stelmach J., *Pomiary prędkości cieczy w mieszalniku z użyciem znaczników przepływu*, Inż. Apar. Chem., 48(40), 1, s.112-113, 2009.
113. Heim A., Stelmach J., *Porównanie efektywności wnikania masy dla mieszadeł z napowietrzaniem bęłkotkowym*, Ochrona Środowiska Rocznik, t. 11,część 1, s.207-219, 2009.
114. Kuncewicz Cz., Stelmach J., *Wykrywanie krawędzi obrazów pęcherzyków*, Inż. Apar. Chem., 48(40), 6, s.113-114, 2009.
115. Stelmach J., *Powierzchnia międzyfazowa wewnątrz samozasysającego mieszadła tarczowego*, Chemik - nauka - technika - rynek (suplement), 6, s.278, 2009.
116. Stelmach J., *Współczynniki wnikania masy dla mieszadeł Rushtona i samozasysającego*, Inż. Apar. Chem., 48(40), 4, s.122-123, 2009.
117. Stelmach J., Pietrzykowski M., *Użycie transformacji Hougha do określania rozmiarów pęcherzyków gazu w wodzie*, Inż. Apar. Chem., 48(40),6, s.18-181, 2009.
118. Kuncewicz Cz., Stelmach J., *Zastosowanie autokorelacji do określania prędkości pęcherzyków gazu na podstawie zdjęć z podwójną ekspozycją*, Inż. Apar. Chem., 49(41),1, s.63-64, 2010.
119. Stelmach J., *Określanie prędkości pęcherzyków gazu na wysokości samozasysającego mieszadła tarczowego*, Inż. Apar. Chem., 49(41),1, s.105-106, 2010.
120. Kuncewicz Cz., Niedzielski M., Stelmach J., *Wyznaczanie średniej szybkości ścinania w mieszalniku dla zakresu mieszania laminarnego*, Przem. Chem., 90, 9, s. 1656-1660, 2011.
121. Kuncewicz Cz., Stelmach J., *Mass transfer coefficients during aeration by self-aspirating impeller*, Proceedings of 14th European Conference on Mixing (10-13.09), s.241-246, 2012.
122. Kuncewicz Cz., Rieger F., Pietrzykowski M., Stelmach J. *3D/2D hybrid model for ribbon impellers operating in laminar regime*, Chem. Eng. Proces.: Process Intensification, 73, s.50-58, 2013.

123. Stelmach J., *Porównanie doświadczalnych wartości współczynnika wnikania masy z obliczonym na podstawie wybranych modeli procesu wymiany masy*, Inż. Apar. Chem., 52 (44), 3, 244-246, 2013.
124. Stelmach E., Krzystek L., Stelmach J., Ledakowicz St., *Anaerobowa degradacja organicznej frakcji stałych odpadów komunalnych*, Inż. Apar. Chem., 48(40),3, s.107-108, 2009.
125. Stelmach E., Krzystek L., Stelmach J., Ledakowicz St., *Przemywanie stałych odpadów komunalnych w mieszalniku bębnowym*, Inż. Apar. Chem., 48(40),1, s.114-115, 2009.
126. Stelmach E., Krzystek L., Stelmach J., Ledakowicz St., *Kinetics of movement of municipal solids wastes in a water filled drum mixer*, Proceedings of 13th European Conference on Mixing (14-17.04), CD, s.1-8, 2009.
127. Stelmach E., Stelmach J., Krzystek L., Ledakowicz St., *Wpływ zawartości węgla i azotu na szybkość produkcji biogazu z organicznej frakcji stałych odpadów komunalnych*, Inż. Apar. Chem., 49(41), 1, s.107-108, 2010.
128. Ledakowicz St., Krzystek L., Stelmach E., Zawadzka A., Stelmach J., Kahle J., *Recovery and biological utilization of organic wastes from landfills*, Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering for Waste and Biomas Valorisation, Pendrive, s. 1-6, 2010.

Lede, 9.06.2015 *Stelmach*