

MECHANIKA PŁYNÓW – DLACZEGO TAK TRUDNO PRZEWIDZIEĆ RUCH PŁYNU?

Stanisław Drobnia

Instytut Maszyn Ciepłych
Politechnika Częstochowska
e-mail: drobnia@imc.pcz.czyst.pl

Tomasz A. Kowalewski

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
e-mail: tkowale@ippt.gov.pl

1. Wprowadzenie

Mechanika płynów to dział fizyki opisujący zjawiska związane z ruchem cieczy i gazów. Zastanawiając się na zakresie zainteresowań mechaniki płynów możemy łatwo zauważyć, że niemal wszystko, co otacza człowieka jest w dużej części płynem i rządzi się prawami mechaniki płynów. Już starożytni intuicyjnie zauważyli, że spośród czterech podstawowych pierwiastków struktury wszechświata (powietrze, ogień, woda i ziemia), trzy są płynami. Czwarty, ziemia, też w rzeczywistości jest płynem za wyjątkiem cienkiej skorupy stałej. Wydaje się, że jest w tej uproszczonej odpowiedzi na nasze pytanie dużo prawdy. Znaczenia mechaniki płynów dla zrozumienia praw rządzących naturalnym środowiskiem człowieka jak i jego życiowymi funkcjami nie trzeba uzasadniać.

Mechanika płynów to także dziedzina techniki i działalności inżynierskiej, gdyż wiele, jeśli nie większość, procesów przemysłowych opiera się na mechanice płynów. Często niedostrzeganie roli mechaniki płynów wiąże się ze specyfiką danej dziedziny, odmienną nomenklaturą lub wąskim zakresem jej zastosowań. Ale poczynając zarówno od opisu huraganów, wybuchów wulkanów, wybuchów na słońcu, transportu ropy czy odlewania metali, jak i procesów oddychania, przepływu krwi, procesów wewnątrz komórkowych, wszystkie te procesy opierają się na mechanice płynów. Co ważne, wszystkimi tego typu procesami rządzi w rzeczywistości jedno podstawowe równanie mechaniki płynów, równanie Naviera-

Stokes'a. Mogłoby się wydawać, że jest to znakomite ułatwienie. W rzeczywistości rozwiązanie tego równania dla istotnej klasy przepływów, przepływów turbulentnych, pozostaje ostatnim nie rozwiązany, ważkim problemem fizyki klasycznej. Nadal aktualna jest ufundowana przez Clay Mathematics Institute nagroda w wysokości 1 miliona dolarów dla „śmiałka”, który wykaże matematyczną jednoznaczność rozwiązań tego wydawałoby się prostego równania [1]. Ze względu na tę zasadniczą trudność rozwój mechaniki płynów na przestrzeni wieków odbywał się stosunkowo powoli i właściwie dopiero w ostatnim 50-leciu możemy mówić o znaczącym postępie, zapoczątkowanym pracami genialnego obserwatora przepływów Ludwiga Prandtla [2]. Problemom z opisem przepływów turbulentnych, tj. przepływów analizowanych w skali makroskopowej, poświęcimy pierwszą część tego opracowania.

Kłopoty, na jakie napotyka mechanika płynów pojawiły się również z drugiej strony skali wymiarowej, w układach mikro i nanoprzepływów. Poprawny opis przepływu w tych skalach jest istotny dla diagnozowania układów biologicznych, sterowania miniaturowymi systemami analizy chemicznej i biologicznej, mikro systemami dostarczania leków i czynników hamujących wzrost komórek rakowych, jak i do zrozumienia przebiegu zawiłych procesów mechanicznych i chemicznych w tej najbardziej skomplikowanej fabryce wszechświata, jaką jest komórka biologiczna. Problematyce mikro i nano-przepływów, stosunkowo młodej gałęzi mechaniki płynów poświęcimy drugą część opracowania.

Ale prawdziwy przełom w mechanice płynów dokonuje się właśnie teraz. Postęp w rozwoju techniki komputerowej i rozwój nowych metod obliczeniowych spowodował, że od kilku lat zarówno w skali makro jak i mikro jesteśmy świadkami tego, co jeszcze kilkanaście lat temu wydawało się niemożliwe. W skali makro widzimy próby numerycznego symulowania ruchu turbulentnego bez żadnych założeń upraszczających, wykorzystując jedynie podstawowe równanie mechaniki płynów, równanie Naviera-Stokes'a (metoda ta określana jest terminem DNS – Direct Numerical Simulation [3]). W skali mikro i nano obserwujemy modelowanie mikro i nano-przepływów z zastosowaniem modeli wiernie oddających strukturę molekularną płynu i sprzęganie wiedzy o oddziaływaniach molekularnych z klasycznym opisem ciągłym płynu. Podobną transformację

przechodzą metody diagnostyki eksperymentalnej, których rozwój jest konieczny, aby wesprzeć budowane modele obliczeniowe. Z perspektywy tych wydarzeń i kolejnych kroków milowych, jakie się dokonują w metodach analizy, symulacji i pomiarów w mechanice płynów, w części trzeciej tego artykułu spróbujemy spojrzeć w przyszłość i przewidzieć, które z od dawna czekających na rozwiązanie problemów i nowych wyzwań staną się siłą napędową mechaniki płynów.

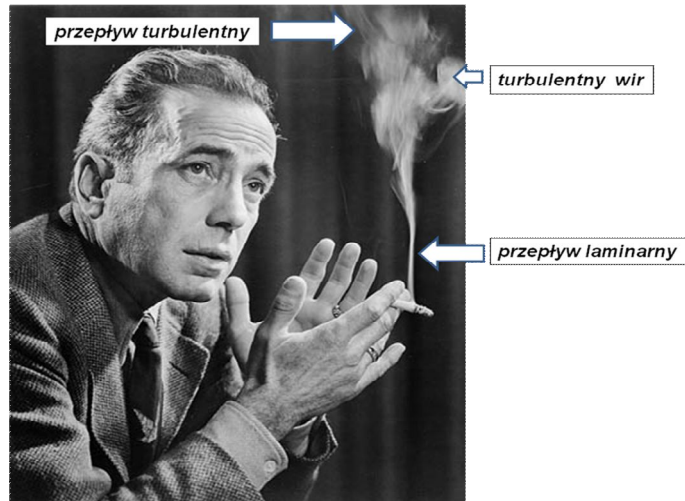
Pisząc nasz artykuł dokonywaliśmy uproszczeń i używaliśmy niezbyt precyzyjnych sformułowań, mamy nadzieję że zainteresowani Czytelnicy zechcą sięgnąć do wskazywanych przez nas źródeł, gdzie omawiane zagadnienia są przedstawione szerzej i bardziej dokładnie. Cytujemy źródła, które łatwo można znaleźć w Internecie, w tym zwłaszcza Wikipedię, która jest dziś jednym z najłatwiej dostępnych źródeł informacji, ponadto podajemy odwołania do artykułów zamieszczonych w polskich pismach naukowych, cytujemy także jedno pismo (*Nature*), które czytać koniecznie trzeba.

2. Mechanika płynów w skali makroskopowej (turbulencja przepływów) i jej związki z życiem codziennym i techniką.

Niniejszy rozdział dotyczy klasycznej mechaniki płynów, którą nazywać będziemy *mechaniką w skali makroskopowej*. Oznaczać to będzie, że płyn będzie dla nas ośrodkiem idealnie ciągłym, czyli że najmniejsze skale (rozmiary zjawisk) którymi będziemy się zajmować będą znacznie większe od rozmiarów atomów i molekuł płynu. Mechanika płynów, zapoczątkowana pracami Galileusza (1564-1642), Torricellego (1608-1642) i Pascala (1623-1662) mimo swej „klasyczności” wynikającej z pięciuset lat prowadzonych w tej dziedzinie badań stanowi wciąż aktualny i daleki od rozwiązania problem poznawczy.

Powodem nieustannego zainteresowania mechaniką płynów jest przede wszystkim istnienie *turbulencji* przepływów i *wieloskalowy* charakter tego zjawiska. Ilustrację zjawiska turbulencji przedstawiono na zdjęciu wspaniałego aktora Humphreya Bogarta (rys. 1), który był tak namiętnym palaczem, że trudno jest znaleźć jego zdjęcie bez papierosa. Pokazana na zdjęciu smuga papierosowego dymu jest początkowo spójna i uporządkowana (ten rodzaj ruchu nazywamy

laminarnym) a po chwili traci regularny charakter i pojawiają się w niej *wiry*, stanowiące podstawowy składnik ruchu *turbulentnego*. Rys. 1 pokazuje, że przepływ laminarny istnieje tylko w początkowej strefie smugi dymu i obserwacja ta jest prawdziwa dla zdecydowanej większości przepływów. Można powiedzieć, że przepływ laminarny jest w przyrodzie i technice wyjątkiem, natomiast przepływ turbulentny regułą i wynikają z tego dla nas zarówno dobre jak i złe skutki.



Rys. 1 Laminarny i turbulentny przepływ smugi dymu z papierosa trzymanego przez Humphreya Bogarta [4]

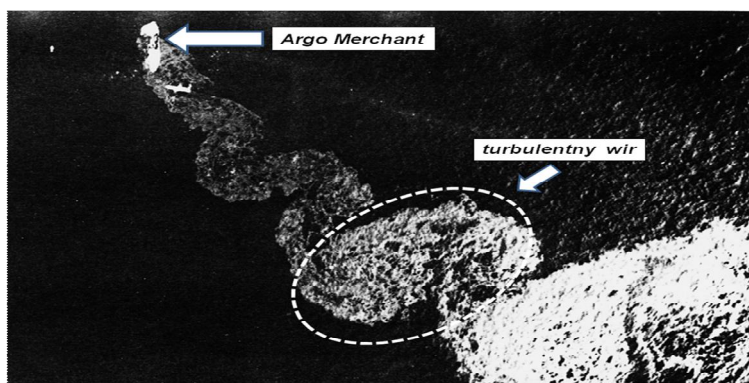
Złym skutkiem powszechności turbulencji jest fakt, że opór aerodynamiczny w przepływie turbulentnym jest proporcjonalny do kwadratu prędkości, natomiast w przepływie laminarnym do pierwszej jej potęgi. Można zatem sądzić, że jeśli umielibyśmy budować samochody, statki i samoloty poruszające się ruchem laminarnym, wówczas ich opór rósł by znacznie wolniej z prędkością i do ich napędu potrzeba by znacznie mniej energii (omówimy ten problem szerzej w dalszej części artykułu).

Dla wyjaśnienia pożytków z turbulencji musimy wytłumaczyć, na czym polega wielkoskalowość turbulencji. Ilustracją tego pojęcia może być zdjęcie lotnicze (rys. 2) katastrofy tankowca „Argo Merchant”, który w grudniu 1976 osiadł na mieliźnie w pobliżu Nantucket (USA), a z przełamanego kadłuba wyciekło 26 milionów litrów oleju opałowego. Struga oleju wypływająca z

rozprutego kadłuba jest wyraźnie turbulentna, o czym świadczą widoczne wiry, których rozmiar szybko rośnie w miarę oddalania się od statku.

Porównanie długości kadłuba z rozmiarem plamy oleju wskazuje, że turbulentne wiry osiągają wielkość liczoną w kilometrach a jednocześnie należy zdać sobie sprawę, że zaznaczony tu makrowir składa się z olbrzymiej ilości zawartych w nim wirów, z których najmniejsze mają rozmiar rzędu dziesiątych części milimetra (*wiry dysypatywne* rozpraszające energię ruchu w ciepło). Skale turbulentnych wirów pokrywają więc w sposób ciągły zakres rozciągający się od ułamków milimetra (skala procesów dysypatywnych stanowiących jedną z istotnych cech turbulencji) do metrów (przepływy techniczne) lub nawet setek i tysięcy kilometrów (turbulencja geofizyczna).

Istotą przepływu turbulentnego jest zatem nieskończona liczba interakcji pomiędzy poszczególnymi wirami (skalami) co nazywamy *wieloskalowym* charakterem zjawiska turbulencji. Wielkoskalowość turbulencji powoduje, że przepływ turbulentny bardzo szybko zwiększa swe rozmiary, co widać nie tylko na zdjęciu plamy oleju, lecz także i na rys. 1, gdzie wąska laminarna struga dymu z papierosa trzymanego przez Humphreya Bogarta gwałtownie rozszerza się po przejściu w przepływ turbulentny.



Rys. 2 Zdjęcie lotnicze wycieku ropy z tankowca Argo Merchant [5]

Turbulencja jest zatem odpowiedzialna za to, że dym tytoniowy czujemy niemal natychmiast po zapaleniu papierosa w pokoju, ale też musimy pamiętać, że dzięki turbulencji czujemy ciepło już po chwili od włączenia grzejnika. Gdyby w

przyrodzie istniał tylko ruch laminarny, wówczas nagrzanie przeciętnego pokoju wymagałoby co najmniej tygodnia od chwili włączenia ogrzewania [6]. Turbulencja spowodowała również, że olej wyciekający z Argo Merchant po kilku dniach pokrył obszar o rozmiarze 100 x 200 kilometrów, to samo zjawisko odpowiedzialne jest również za „uziemienie” samolotów w całej niemal Europie po wybuchu wulkanu w Islandii na początku 2010 r. (w rezultacie jeden z autorów artykułu wracał z konferencji we Włoszech przez całą noc zamiast dwugodzinnej podróży samolotem).

Uwzględnienie złożonej struktury turbulencji przepływu konieczne ze względu na istotną intensyfikację wszystkich procesów transportu zachodzących w przepływach turbulentnych, stanowi podstawowe zadanie mechaniki płynów. Czy mechanika płynów wywiązuje się z tego zadania ? – z pewnością nie, o czym świadczy np. niemożność przewidzenia zasięgu chmury pyłu wyrzucanej przez islandzki wulkan i wynikający stąd kataklizm komunikacyjny. Oznacza to, że mechanika płynów ma jeszcze wiele do zrobienia i że jest ona potrzebna wszystkim a nie tylko mechanikom.

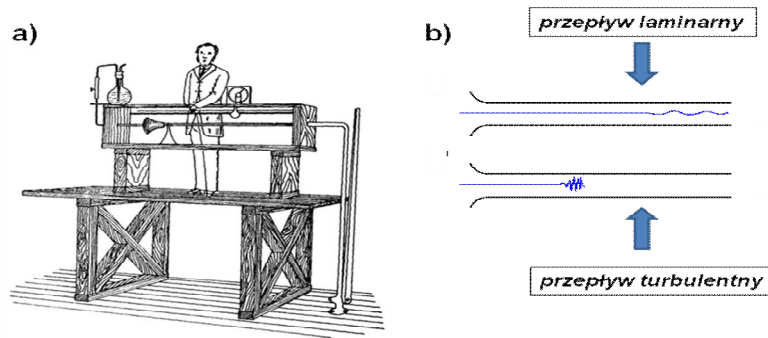
W rozdziale 1 wspomniano, że wszystkie zjawiska klasycznej (makroskopowej) mechaniki płynów opisane są jednym równaniem, opracowanym w I połowie XIX wieku przez Francuza C. L. Naviera (1785 – 1836) i Anglika G. G. Stokesa (1819 – 1903). Warto zauważyć, że obydwaj odkrywcy byli w równej mierze inżynierami i naukowcami, którzy niezależnie sformułowali wniosek z równań dynamiki Newtona, znany dziś jako równanie Naviera – Stokesa (N – S). Dla opisu ruchu płynów newtonowskich równanie to (a właściwie układ równań) zapisane być może z użyciem konwencji sumacyjnej Einsteina w następującej postaci:

$$\rho \frac{DU_i}{Dt} = F_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

Jesteśmy świadomi, że każde zamieszczone w artykule równanie zmniejsza liczbę czytelników o połowę, jednak przytaczamy równanie N – S nie tylko dla jego piękna, lecz także i materialnej wartości – proszę pamiętać, że każdy kto

udowodni istnienie jego rozwiązania otrzyma milion dolarów (nam się to nie udało ale zachęcamy młodych czytelników).

Dodatkową trudnością w opisie ruchu płynów był brak pewności, czy równanie N – S opisać może dwa różne stany ruchu płynu tj. ruch laminarny i turbulentny. W roku 1883 O. Reynolds, profesor Owens College w Manchesterze, opublikował pracę [4], która wydawała się rozstrzygać tę kwestię dzięki zastosowaniu bardzo pomysłowego zabiegu, zwanego wizualizacją. Płyny są w znakomitej większości przezroczyste co sprawia, że nie widzimy ich



Rys. 3 Stanowisko badawcze O. Reynoldsa a) i obrazy strugi barwnika b) w przepływie laminarnym i turbulentnym [7]

ruchu i dlatego O. Reynolds wprowadził do przepływu w szklanej rurze smugę barwnika, co pozwoliło na obserwację sposobu, w jaki porusza się płyn (rys. 3a). Eksperyment Reynoldsa wykazał, że jedynie w przepływie laminarnym płyn zachowuje się w sposób przewidywalny, natomiast w ruchu turbulentnym smuga barwnika ulega szybkiemu rozmyciu (patrz rys. 3b) na skutek istnienia szybkich zmian kierunku i wartości wektora prędkości. Logiczną konsekwencją eksperymentu O. Reynoldsa był wniosek, że równanie N – S może opisywać tylko ruch laminarny, natomiast dla opisu ruchu turbulentnego O. Reynolds zaproponował zmodyfikowaną postać równania:

$$\rho \frac{D\bar{U}_i}{Dt} = F_i + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

znaną jako równanie RANS (Reynolds Averaged N – S), w którym symbol ($\overline{\quad}$) oznacza uśrednianie Reynoldsa. Uśrednianie zastosowane przez Reynoldsa miało poważne skutki. Po prawej stronie równania w wyrażeniu $\overline{\sigma_{ij}}$ pojawiła się nowa niewiadoma i układ równań stał się nie zamknięty, bo liczba niewiadomych była większa niż liczba równań. Jak uczy nas algebra, tak sformułowanego układu równań nie da się rozwiązać bez dołożenia nowego równania nazywanego w mechanice płynów *modelem turbulencji*. Poszukiwanie takiego równania zajęło mechanice płynów cały następny wiek i choć wynaleziono już kilkadziesiąt modeli turbulencji to poszukiwania te trwają nadal.

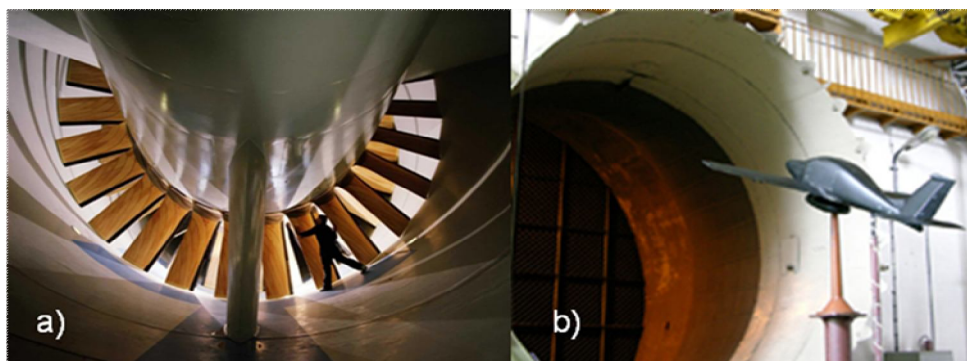
Niemожność uzyskania rozwiązań zarówno równania N – S (wz. 1) jak i równania RANS (wz. 2) sprawiły, że mechanika płynów aż do lat 70' XX wieku była nauką doświadczalną, odpowiadającą na potrzeby praktyki poprzez eksperyment. Siłą napędową mechaniki płynów od początku XX wieku było lotnictwo, które domagało się wskazówek, jak projektować coraz szybsze, bezpieczniejsze i bardziej ekonomiczne samoloty. Rozwiązaniem były badania w tunelach aerodynamicznych, w których pomniejszone modele samolotów umieszczano w strumieniu powietrza (rys. 4a) na wspornikach połączonych z urządzeniem (*wagą aerodynamiczną*) umożliwiającym pomiar sił aerodynamicznych działających na model.



Rys. 4. Model samolotu badany w tunelu aerodynamicznym a) i zaprojektowany z użyciem badań modelowych samolot MD 80 b) [8, 9]

Rozwój elektroniki, optyki i technologii laserowych umożliwił opracowanie bardzo dokładnych *metod pomiaru* sił, prędkości i ciśnienia powietrza w tunelach aerodynamicznych. *Teoria podobieństwa przepływów* pozwala z kolei na tak

dokładne przeliczanie wyników *badania modelowych* do skali prawdziwego samolotu, że po kilku tysiącach godzin badań modelowych powstaje samolot o pożądanym charakterystykach (patrz rys. 4b). Wiarygodne badania modelowe wymagają użycia tuneli o olbrzymich rozmiarach, pokazany na rys. 5a tunel ośrodka badawczego NASA w Langley ma średnicę przestrzeni pomiarowej wynoszącą ponad 5 metrów, natomiast jeden z mniejszych tuneli Instytutu Lotnictwa w Warszawie pokazany na rys. 5b ma przestrzeń pomiarową o wymiarach 0.6 x 0.6 metra. Napęd wentylatorów tuneli aerodynamicznych wymaga stosowania silników o mocach liczonych w setkach i tysiącach kW i angażowania dziesiątek specjalistów wykonujących modele i pomiary w tunelach

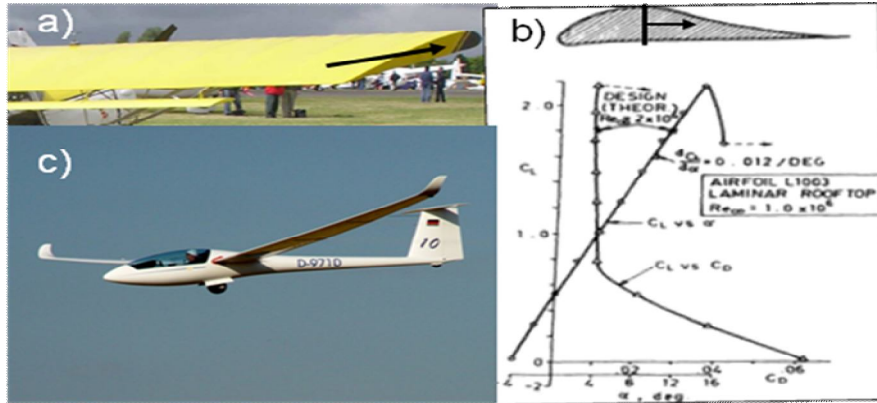


Rys. 5. Tunel aerodynamiczny NASA Langley Research Centre (USA) a) i tunel Instytutu Lotnictwa w Warszawie [10, 11]

oraz analizujących otrzymane w ten sposób charakterystyki aerodynamiczne modeli i profili. Nie jest zatem zaskoczeniem, że koszty stworzenia nowych modeli dużych samolotów pasażerskich liczone są w miliardach dolarów i euro i mogą to wytrzymać finansowo jedynie tak wielkie firmy jak Boeing w USA czy Airbus w Europie. Oczywiście jest również dążenie do zmniejszenia kosztów badań poprzez zastąpienie drogich badań modelowych znacznie tańszymi obliczeniami, pod warunkiem że uzyskane wyniki będą równie dokładne i że nie będzie się to odbywać kosztem bezpieczeństwa konstrukcji i własności aerodynamicznych samolotu.

Pierwsze sukcesy nowych metod projektowania samolotów pojawiły się już w latach siedemdziesiątych, kiedy moce obliczeniowe komputerów pozwoliły na przeprowadzenie obliczeniowych testów profili lotniczych, czyli kształtów

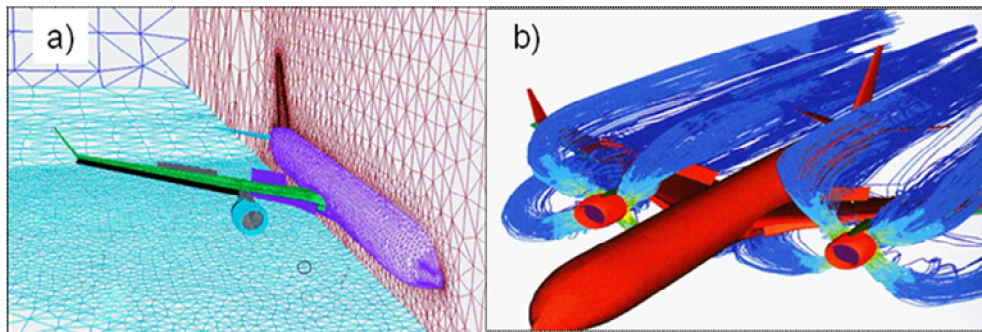
przekroju poprzecznego skrzydła. Kształt profilu lotniczego skrzydła samolotu [9] zaznaczony strzałką na rys. 5a projektowany jest tak, aby powietrze płynące nad skrzydłem przebywało dłuższą drogę niż pod nim i wytwarzało siłę nośną utrzymującą w powietrzu poruszający się samolot.



Rys. 6. Skrzydło samolotu [12] z zaznaczonym kształtem profilu aerodynamicznego a), wyniki obliczeń charakterystyk aerodynamicznych profilu przeprowadzone przez R. Liebecka [13] i nowoczesny szybowiec LS10 z laminarnym profilem skrzydła [14]

W roku 1978 Robert H. Liebeck, aerodynamik w firmie Boeing pokazał, że potrafi zastąpić badania modeli prowadzone w tunelu aerodynamicznym „testem obliczeniowym” prowadzonym w komputerze. Pokazane na rys. 6b wyniki obliczeń współczynnika siły nośnej C_L i współczynnika siły oporu C_D okazały się równie wiarygodne jak wyniki badań w tunelu aerodynamicznym i dzięki temu Robert Liebeck (dziś profesor słynnego MIT) mógł zaprojektować i przetestować w komputerze skrzydło laminarne. Grubą kreską na profilu pokazanym na górze rys. 5b zaznaczono maksymalną grubość, która dla tradycyjnego profilu skrzydła występuje w pobliżu noska (lewa strona profilu). Skrzydło laminarne, charakteryzujące się znacznie mniejszym oporem przy dużych prędkościach lotu, winno mieć największą grubość w połowie długości profilu (co zaznaczono strzałką na rys. 5b). Przebadane w komputerze warianty kształtu profilu doprowadziły do stworzenia nowoczesnych skrzydeł szybowców, które tak jak pokazany na rys. 6c szybowiec LS10 potrafią zamienić każdy metr wysokości na 50 metrów lotu poziomego.

Sukces metod komputerowego modelowania opływu profili zachęcił konstruktorów i uczonych do rozwoju metod obliczeniowych i dziś w przemyśle lotniczym testy komputerowe w coraz większym stopniu zastępują badania modelowe w tunelach aerodynamicznych. Przykład obliczeń opływu samolotu pokazano na rys. 7, na którym komputerowy model samolotu utworzony jako siatka punktów (węzłów, w których rozwiązywane jest równanie 2) widoczny jest na rys. 7a. W pobliżu ścian kadłuba i skrzydeł gdzie występują największe zmiany prędkości i ciśnienia zagęszczono siatkę, kolorami zaznaczono podział na elementy konstrukcyjne samolotu (kadłub, skrzydło itd.). Założono, że przepływ będzie symetryczny względem płaszczyzny pionowej przechodzącej przez oś kadłuba, co pozwoliło zredukować o połowę liczbę węzłów. Na rys. 7a pokazano jedynie węzły umieszczone na powierzchni samolotu i na płaszczyznach ograniczających obszar obliczeniowy, trzeba jednak pamiętać, że węzły znajdują się w całej pokazanej tu przestrzeni. Całkowita liczba węzłów dla pokazanego na rys. 7a przypadku wynosi od kilku do kilkunastu milionów i mimo, że węzły generowane są automatycznie przez odpowiednie programy, to jest to najbardziej czasochłonny etap modelowania. Doświadczony zespół programistów potrzebuje kilku lub nawet kilkunastu dni aby opracować i przetestować siatkę, która będzie podstawą do przeprowadzenia obliczeń. Modelowanie wykonuje się na klastrach równolegle pracujących procesorów, których liczbę dobiera się tak, aby obliczenia można było przeprowadzić w systemie „overnight” tj., aby po uruchomieniu obliczeń pod koniec dnia roboczego wyniki były gotowe następnego dnia rano.

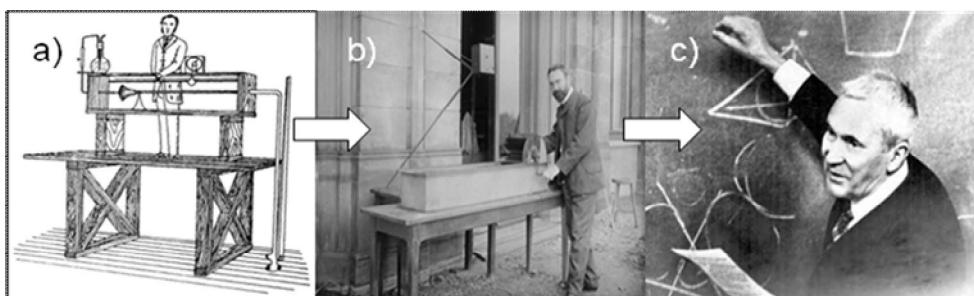


Rys. 7. Komputerowy model samolotu stworzony jako siatka węzłów obliczeniowych a) i wyniki obliczeń przepływu przy stosowaniu ciągu wstecznego w trakcie lądowania [15]

Przykład możliwych zastosowań komputerowego modelowania w lotnictwie pokazano na rys. 7b, gdzie liniami zaznaczono drogę spalin wyrzucanych z silników pracujących z ciągiem wstecznym w trakcie lądowania. Masa dużego samolotu pasażerskiego podchodzącego do lądowania przekracza z reguły 100 ton i aby zmniejszyć obciążenie hamulców silniki przestawiane są w układ ciągu wstecznego. Potencjalnym zagrożeniem dla bezpieczeństwa samolotu i pasażerów może być zasysanie spalin przez silniki, jak pokazują to jednak wyniki z rys. 7b spaliny omijają wloty silników co oznacza, że testowany komputerowo samolot zdał pomyślnie ten trudny egzamin.

Od lat 80' w projektowaniu każdej kolejnej generacji samolotów zwiększa się rola modelowania komputerowego, które zastępuje kosztowne i czasochłonne badania modelowe, zmniejsza koszt badań i skraca okres potrzebny do stworzenia nowej konstrukcji. Dzięki nowym osiągnięciom mechaniki płynów współczesne samoloty na przewiezienie jednego pasażera na odległość 100 kilometrów zużywają niewiele ponad 2 litry paliwa, co oznacza, że podróże lotnicze są dziś najbardziej ekonomicznym, przyjaznym środowisku i najwygodniejszym sposobem przemierzania świata. Oznacza to także, że lotnictwo będzie rozwijać się jeszcze szybciej niż do tej pory i potrzebować będzie wysokokwalifikowanych specjalistów. Pojawia się oczywiste pytanie, dlaczego dopiero w końcu lat 70' pojawiły się pierwsze próby zastosowania komputerowego modelowania w projektowaniu samolotów i czy mechanika płynów nie mogła sprostać temu ważnemu wyzwaniu wcześniej? Odpowiedź na to pytanie wymaga kolejnej wycieczki w historię mechaniki płynów, w której zatrzymaliśmy się na pokazanym ponownie na rys. 8a doświadczeniu Reynoldsa i równaniu Reynoldsa (wz. 2).

Przypomnijmy, że O. Reynolds stwierdził, że równanie $N = S$ opisywać może jedynie ruch laminarny i dla najpowszechniejszego w przyrodzie ruchu turbulentnego zaproponował zmodyfikowane równanie, którego jednak nie potrafił rozwiązać. Trzeba było aż 50 lat, aby Ludwig Prandtl (1875-1953), wybitny niemiecki uczony, twórca aerodynamiki lotniczej, znalazł sposób rozwiązania równania (2). Propozycja Prandtla nie miała należytej uniwersalności i w związku z tym mogła być stosowana jedynie w ograniczonej liczbie przepływów.



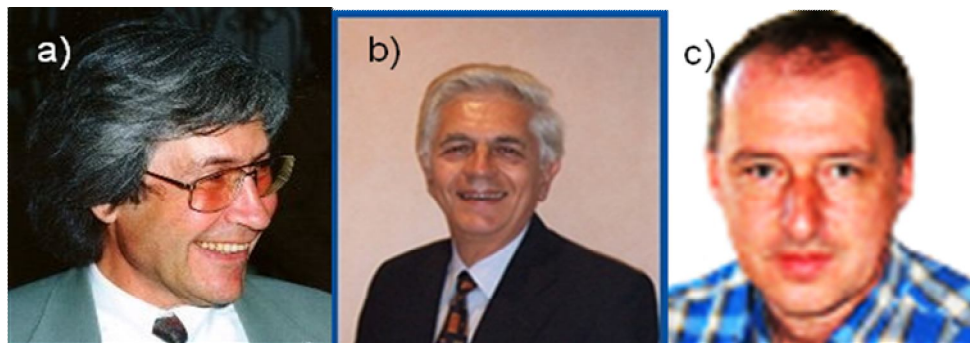
Rys. 8. Autorzy podstaw teoretycznych współczesnej mechaniki płynów, poczynając od O. Reynoldsa a), poprzez L. Prandtla b) do A. Kołmogorowa c) [2, 7, 16]

Ostatni fragment teorii przepływów turbulentnych stworzył genialny matematyk rosyjski Andrej Kołmogorow (1903 – 1987), tworząc *statystyczną teorię turbulencji*, która do dzisiejszych czasów zachwyca pięknem matematycznych sformułowań i przeraża swą złożonością. Nie bez powodu przytacza się wypowiedź jednego z twórców nowoczesnej fizyki, laureata nagrody Nobla Wernera Heisenberga, który zapytany o co chciałby prosić Boga odpowiedział, że „...o teorię względności i turbulencji, i tylko w pierwszym przypadku jestem na tyle optymistą, że spodziewałbym się odpowiedzi...” [17]. Anekdota ta jest chyba jednak wyrazem frustracji, że tak piękna teoria stworzona przez Reynoldsa, Prandtla i Kołmogorowa nie mogła być zastosowana w praktyce, bo nie istniały jeszcze komputery zdolne rozwiązać tak piękne ale i skomplikowane równania.

Przełom nastąpił z początkiem lat 70', kiedy to nastąpiła eksplozja znakomitych pomysłów na nowe modele turbulencji, zaproponowane m.in. przez emerytowanych dziś (choc nadal bardzo aktywnych) znakomitych profesorów Wofganga Rodi i Kemo Hanjalica, których zdjęcia pokazano na rys. 9. Komputery z lat 70' urosły już na tyle, że autorzy nowych modeli turbulencji mogli nie tylko przedstawić nowe modele lecz także użyć komputerów do obliczania przepływów turbulentnych i pokazać zdumiewające wówczas możliwości nowej techniki komputerowego modelowania przepływów. Warto zwrócić uwagę, że pokazane na rys. 7 wyniki komputerowego modelowania aerodynamiki samolotu otrzymano z wykorzystaniem modeli będących nowszymi wersjami pomysłów W. Rodi i

K. Hanjalica, które z kolei wykorzystywały wcześniejsze odkrycia Reynoldsa, Prandtla i Kołmogorowa.

Modelowanie turbulencji podsumowuje zatem przeszło stuletnie wysiłki mechaniki płynów, lecz nie jest wcale dziedziną zamkniętą, w której nowe pomysły skończyły się w latach siedemdziesiątych. Autorem najnowszych i bardzo obiecujących modeli turbulencji jest młody (a przynajmniej znacznie młodszy od autorów tego artykułu) doktor Florian Menter, którego zdjęcie pokazano na rys. 9c.



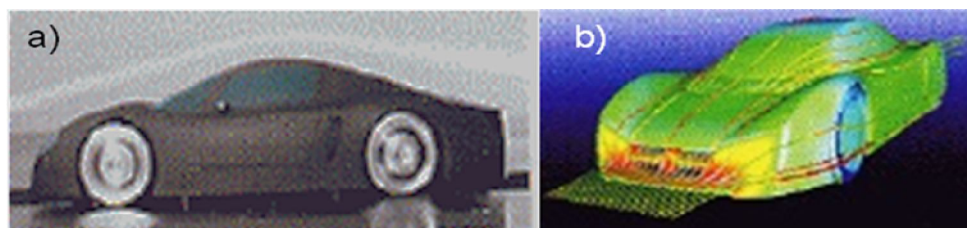
Rys. 9. Autorzy najpowszechniej dziś używanych modeli turbulencji W. Rodi a) K. Hanjalic b) i F. Menter c)

Warto zwrócić uwagę, że wszyscy znakomici uczeni pokazani na rys. 9 wielokrotnie wygłaszali wykłady w trakcie Szkół Letnich Mechaniki Płynów organizowanej przez Sekcję Mechaniki Płynów Komitetu Mechaniki PAN.

W wieku XX lotnictwo, które przeznacza ok. 20% wpływów ze sprzedaży na tzw. B+R (badania i rozwój), było liderem rozwoju techniki opartej na wiedzy i w największym stopniu stymulowało rozwój mechaniki płynów. W ostatnich latach obserwujemy, że także i inne dziedziny przemysłu zaczynają podążać drogą wytyczoną przez lotnictwo a dotyczy to przede wszystkim przemysłu samochodowego, który co prawda przeznacza zaledwie 3-5% wpływów na B+R, ale jest także dziedziną techniki w znacznym stopniu opartym na osiągnięciach nauki. W roku 2002 na salonie w Paryżu pokazano nowy samochód studyjny Opel Eco Speedster, który dla publiczności był dowodem, że możliwe jest zbudowanie szybkiego, sportowego samochodu, który zużywa średnio 2,5 litra paliwa na 100 kilometrów. Dla inżynierów był to natomiast dowód efektywności nowych technik projektowania, które zastosowano przy budowie tego samochodu. Przed zespołem

projektantów postawiono zadanie zbudowanie samochodu, który napędzany silnikiem wysokoprężnym 1.3 CDTI o mocy 112 kW będzie osiągał prędkość maksymalną 250 km / godz. przy średnim zużyciu paliwa 2,5 l / 100 km. Wyzwaniem było opracowanie aerodynamiki samochodu, która mogłaby zapewnić uzyskanie założonych osiągnięć samochodu. Przy tradycyjnym sposobie projektowania wymagałoby przeprowadzenia badań modelowych tysięcy różnych wersji kształtu nadwozia w tunelu aerodynamicznym, czego przykład pokazano na rys. 10a.

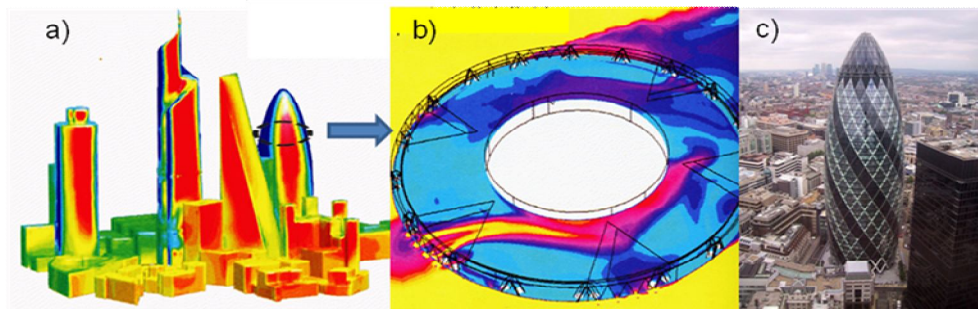
Zastosowanie komputerowego modelowania przepływów pozwoliło przebadать setki wersji modeli komputerowych (rys. 10b) i zredukować liczbę testów w tunelu do ok. 200, dzięki czemu możliwe było siedmiokrotne (!) skrócenie czasu projektowania nadwozia w porównaniu z projektowaniem tradycyjnym. Prototyp Opel Eco Speedster uzyskał zaplanowane zużycie paliwa, natomiast prędkość maksymalna wyniosła 264 km / godz., co oznaczało, że opór aerodynamiczny uzyskany przez projektantów był o 5% niższy od zakładanego. Sukces nowej techniki projektowania sprawił, że komputerowe modelowanie przepływów stosowane jest dziś nie tylko w opracowywaniu kształtu nadwozi, lecz także w projektowaniu chłodzenia silników, hamulców i wentylacji wnętrza samochodu.



Rys. 10. Model samochodu Opel Eco Speedster badany w tunelu aerodynamicznym a) i obraz opływu samochodu w skali 1 : 1 otrzymany metodą modelowania komputerowego[15]

Słynnym przykładem konstrukcji zaprojektowanej z użyciem komputerowego modelowania przepływów jest pokazana na rys. 11c londyńska siedziba towarzystwa ubezpieczeniowego Swiss Re, zaprojektowana przez słynnego architekta Normana Foster'a i ukończona w r. 2004. W projektowanie budynku

zaangażowano kilkudziesięcioosobową grupę mechaników płynów, którzy w trakcie czteroletniej współpracy z architektami wykonali setki badań w tunelach aerodynamicznych i tysiące obliczeń z użyciem modeli komputerowych kolejnych wersji budynku (rys. 11a). Dzięki temu architekci i urbaniści mogli nie tylko ocenić wpływ projektowanego gmachu na budynki sąsiednie, lecz także zaprojektować system wentylacji wykorzystujący ciśnienie dynamiczne wiatru (rys. 11b).

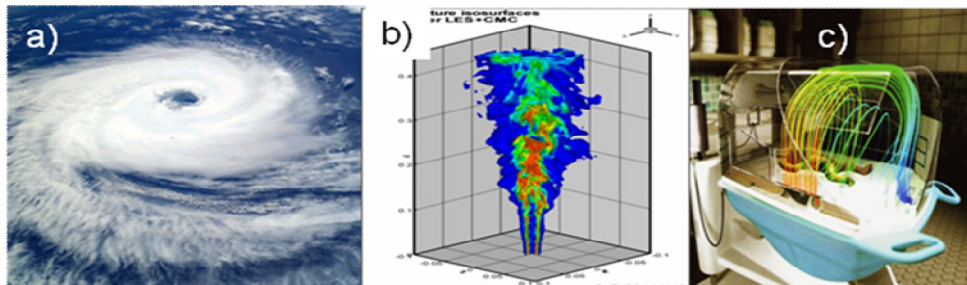


Rys. 11. Model komputerowy budynku Swiss Re a), obraz przepływu powietrza wewnątrz budynku otrzymany metodą modelowania komputerowego b) i widok ukończonego budynku c) [15, 18]

W rezultacie budynek Swiss Re zużywa jedynie połowę ilości energii jakiej potrzebuje zazwyczaj wieżowiec podobnej wielkości, dzięki czemu budynek nazwany przez londyńczyków „ogórkiem” jest gmachem nie tylko pięknym lecz także przyjaznym środowisku. Współpraca architektów i aerodynamików staje się coraz powszechniejsza i doprowadziła do powstania nowego zawodu, który w języku angielskim nazywany jest „*archiengineering*” od połączenia „*architecture*” oraz „*engineering*” [15].

Zastosowania mechaniki płynów nie ograniczają się tylko do lotnictwa, przemysłu samochodowego i architektury. Trudno jest dziś znaleźć dziedzinę życia, w której osiągnięcia mechaniki płynów nie znajdowałyby praktycznych zastosowań. Jednym z większych wyzwań dla mechaniki płynów jest przewidywanie pogody, które nie ogranicza się tylko do udzielania rad, jak powinniśmy się ubrać w dniu jutrzejszym. Przewidywanie ruchu cyklonów to możliwość ocalenia życia wielu ludzi, gdyby było to możliwe w przypadku pokazanego na rys. 11 cyklonu „Catarina”, który w r. 2004 nawiedził Amerykę

Południową [19], wówczas można by uniknąć wielu ludzkich tragedii i miliardowych strat. Już dziś możliwe jest zastosowanie komputerowych modeli przepływów do przewidywania pogody, o czym przekonują bardzo dokładne prognozy Interdyscyplinarnego Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego (ICM) Uniwersytetu Warszawskiego [20].



Rys. 11. Przykłady zastosowań komputerowego modelowania przepływów do przewidywania ruchu cyklonów a), modelowania spalania gazu b) i przepływu powietrza w inkubatorze c) [15, 19, 21]

Kolejny przykład pokazany na rys. 11b pokazuje komputerowy model spalania strugi metanu w której kolorami zaznaczono rozkład temperatury, obliczenia takie wykonuje się dla zmniejszenia szkodliwej emisji m.in. tlenków azotu [19]. Ostatni z pokazanych na rys. 11 przykładów to zastosowanie komputerowego modelowania przepływów do zapewnienia możliwie najlepszych warunków życia w inkubatorze. Warto zaznaczyć, że badania spalania gazu zostały wykonane przez pracowników Instytutu Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej [21] natomiast przepływu w inkubatorze przez absolwentów Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej [22]. Pokazane przykłady dowodzą, że sto lat wyłożonej pracy wielu uczonych sprawia, że mechanika płynów wnosi dziś ważny wkład także i w dziedzinie tak wydawałoby się odległej od techniki jak meteorologia czy medycyna.

Era komputerów wywarła wielki wpływ na nasze życie i zawód inżyniera zajmującego się mechaniką płynów nie jest tu wyjątkiem. Podstawowym narzędziem pracy inżyniera był niegdyś suwak logarytmiczny, zastąpiony później przez kalkulator i komputer. Znacznie ważniejszą zmianą było jednak wprowadzenie narzędzi wspomagania prac inżynierskich znanych jako CAE

(Computer Aided Engineering). Nowoczesny inżynier projektuje nowe konstrukcje przy pomocy narzędzi CAD (Computer Aided Design) a następnie opracowuje technologię wytwarzania nowych konstrukcji przy pomocy oprogramowania CAM (Computer Aided Manufacturing). Obecnie do praktyki inżynierskiej wprowadzane są nowe narzędzia znane jako CFD (Computer Fluid Dynamics), służące do komputerowego modelowania przepływów [23]. Należy jednak pamiętać, że programy CFD, których zastosowanie pokazaliśmy w niniejszym rozdziale, modelują przepływy poprzez rozwiązywanie ruchu płynu w oparciu o równanie Reynoldsa (wz. 2). Programy te powstały co prawda niedawno, lecz było to możliwe dzięki wiedzy zgromadzonej przez wiele pokoleń uczonych zajmujących się mechaniką płynów.

3. Przepływy obserwowane pod mikroskopem - czyli mechanika płynów w skali mikro i nanometrów i jej praktyczne zastosowania

W ostatnich latach dużego znaczenia nabrały badania związane z tzw. nanotechnologiami, tzn. z projektowaniem i wytwarzaniem urządzeń i struktur w skali mikro i nano. Jako datę narodzin problematyki nano powszechnie przyjęto rok 1959, kiedy znakomity fizyk i noblista Richard Feynman w swoim słynnym wykładzie „Jest wiele miejsca pod spodem” (*There's Plenty of Room at the Bottom*) uzmysłowił nam bogactwo niewidzialnego klasycznymi metodami mikroświata [24]. Świat ten widziany w skali makro to w cudowny sposób poskładane z molekuł funkcjonalne materiały czy urządzenia. W ciągu ostatnich kilku stuleci kierując się miarą naszych klasycznych skal zbudowaliśmy wiedzę jak je budować i programować w skalach makro. Rewolucyjność podejścia Feynmana i jego następców polega na wykorzystaniu wiedzy o molekularnej strukturze materii dla stworzenia metod budowania replikujących się automatycznie urządzeń „od dołu” (ang. bottom-up), łącząc grupy molekuł w spełniające zadane cele mikro układy. Mechanizm ten stanowi podstawę funkcjonowania systemów biologicznych, w których budowa i kontrola większości „urządzeń biologicznych” odbywa się przez sprytne manipulowanie małymi grupami „cegiełek molekularnych”. Wprawdzie

postępy nauki i techniki jakie się dokonały w ostatnim półwieczu nadal nie wystarczają aby w dowolny sposób programować i samoorganizować świat molekuł, ale podjęte w większości rozwiniętych krajów badania w tym zakresie doprowadziły do powstania nowej gałęzi nauki, zwanej umownie *nanonauką* (*nano-science*) [25]. Rezultaty tych badań to technologie prowadzące do wytwarzania nowych materiałów, powstawania nowych metod analizy własności fizycznych, chemicznych i biologicznych materii dla mikro, nano czy nawet piko litrowych objętości próbek, które pozwalają na manipulację materią w skali molekularnej i na diagnostykę mechaniczną i biochemiczną na poziomie pojedynczych molekuł. Obszary zastosowań nanotechnologii i związanych z nimi nanonauk powiększają się z każdym dniem, tworząc coraz to nowe dyscypliny w klasycznym podziale wiedzy, takie jak nanomedycyna, nanooptyka, nanoelektronika, nanometrologia i wiele innych z analogicznym przedrostkiem nano [26].

W większości procesów badanych w tych skalach ważną rolę odgrywają płyny, w których zachodzą badane reakcje i zjawiska mikroskalowe. Z tego względu wśród tych nowych dyscyplin istotne miejsce zajmuje mechanika płynów, której mikro i nano wariant nazwano w literaturze angielskiej „*micro and nanofluidics*” [27]. Jej narodziny wiąże się często z gwałtownym rozwojem drukarek atramentowych na początku lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku. Precyzyjne sterowanie ruchem płynu w urządzeniach o wymiarach mikrometrów było poważnym wyzwaniem i zaangażowało w badania procesu tworzenia mikrokropeł atramentu wiele dużych ośrodków przemysłowych. Wkrótce potem okazało się, że podobnymi metodami można konstruować reaktory chemiczne i biologiczne operujące na pikolitrowych kroplach. Osiągnięcia elektroniki w budowaniu układów scalonych wykorzystano do budowania skomplikowanych „scalonych” systemów przepływowych, wyposażonych w mikropompy, mikrozawory, systemy regulacji temperatury, pola elektrycznego, czujniki optoelektroniczne i magnetyczne. A wszystkie te urządzenia wraz z kanałami przepływowymi są wytrawione na płycie przypominającej mikroprocesor w komputerze. Stąd czasem pojawia się termin „cyfrowy układ mikroprzepływowy” (*digital microfluidic device*) - odpowiednik zintegrowanego układu

półprzewodnikowego w elektronice. Projektowanie mikrosystemów przepływowych wymaga współdziałania wiedzy związanej z mechaniką, fizyką i chemią, pokonywania zupełnie innej klasy trudności, związanych z opisem decydujących o ich funkcjonowaniu zjawisk, niż te które napotykamy w makroskali np. przy konstruowaniu samolotu.

Badania mikroprzepływowe obejmują zjawiska, w których znaczącą rolę odgrywa efekt skali, wymagający nowych modeli teoretycznych, numerycznych i metod eksperymentalnych. Prawdopodobnie pierwszym badaczem skal mikroprzepływowych był angielski botanik Robert Brown, który już w 1827 roku używając prymitywnego jak na dzisiejsze czasy mikroskopu zaobserwował tajemnicze ruchy zawieszonych w wodzie pyłków kwiatowych. Te osobliwe ruchy, zwane obecnie ruchami Browna, znalazły po kilkunastu latach swoją interpretację wskazującą na istotny wpływ molekularnej struktury płynu na dynamikę zjawisk obserwowanych w skali makro. Po upływie stu lat, w końcu ubiegłego wieku mikroprzepływy stały się na świecie dynamicznie rozwijającą się dyscypliną, stymulowaną rosnącymi potrzebami biologii molekularnej, medycyny, chemii i mechaniki. W niemal każdym światowym ośrodku naukowym zajmującym się mechaniką płynów znajdziemy grupę „Microfluidics” a hasło *micro- nanofluids* można już znaleźć na ponad 400 tys. stron internetowych.

Przyjmuje się, że teoretyczny opis zjawisk przepływowych w małych skalach można opierać na klasycznej mechanice płynów jedynie dla wymiarów powyżej 100 nanometrów (10^{-9} m). Gdy rozpatrujemy zjawiska w skalach mikrometrów przepływy nadal poddają się klasycznemu ciągłemu opisowi mechaniki płynów, rozszerzonemu jedynie o efekty elektrodynamiczne, chemiczne i powierzchniowe. Jednak na poziomie komórkowym, w oddziaływaniach ze strukturami o wymiarach rzędu nanometrów wkraczamy w skalę, gdzie opis mechaniczny wymaga analiz oddziaływań na poziomie molekularnym. Dopiero na ich podstawie można poszukiwać uproszczonych modeli mechanicznych i w związku z tym do analizy zjawisk przepływowych w mikro i nanoskali stało się konieczne zaadoptowanie technik numerycznych rozwijanych wcześniej dla gazów rozrzedzonych.

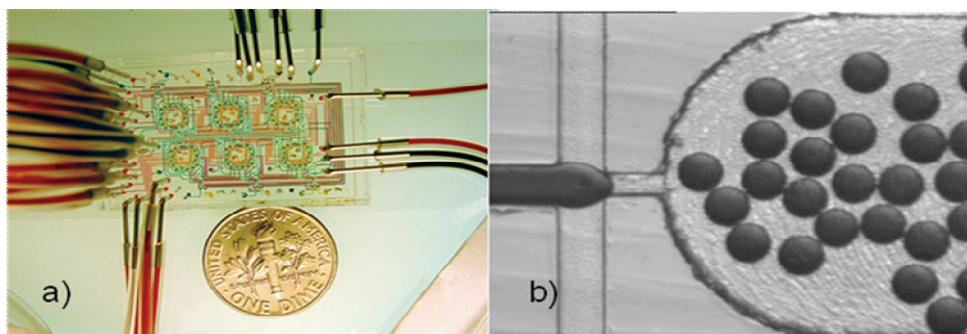
Dziedziny w których operuje obecnie tematyka mikroprzepływowa to przede wszystkim rozwijanie systemów do analizy i syntezy związków chemicznych w

pikolitrowych objętościach. Są to tak zwane systemy totalnej analizy (*microTAS*) i laboratoria „na chipie” (*lab-on-a-chip*) [28], w założeniu pozwalające na umieszczeniu wewnątrz scalonego układu mikroprzepływowego wszystkich urządzeń koniecznych do wykonania skomplikowanej procedury badawczej. A więc może to być mikrofabryka środków łatwo palnych lub w inny sposób niebezpiecznych, której awaria z uwagi na małe objętości składników nie stanowi zagrożenia dla otoczenia, a powielenie mikrosystemu w tysiącach czy nawet milionach egzemplarzy, tak jak powiela się elementy procesora w komputerze, umożliwia zaspokojenie dużych mocy produkcyjnych. Dzięki niewielkim ilościom zużywanych składników możliwe jest testowanie tysięcy reakcji tak by znaleźć optymalne rozwiązanie. Małe wymiary systemów pozwalają między innymi na budowanie czujników obecności materiałów wybuchowych czy narkotyków na lotniskach, z powodzeniem zastępujących nos psa. Ale największym polem zastosowań mikrosystemów jest biologia i medycyna. Ponieważ większość zjawisk biologicznych zarówno na poziomie makro jak i mikro i nano związana jest z przepływem płynu, techniki badawcze rozwijane w biofizyce i biochemii w dużej części dotyczą diagnostyki różnego typu przepływów, przy czym mikrosystemy przepływowe odgrywają tutaj pierwszoplanową rolę.

Budowa układów mikroprzepływowych stworzyła nowe możliwości diagnostyczne w skalach fizycznych i czasowych dotychczas niedostępnych. Wykorzystywane w nich efekty hydrodynamiczne pozwalają na sterowanie reakcjami enzymatycznymi, dozowanie, sortowanie i enkapsulację komórek, czy sterowanie przepływem nanowłókien i biologicznych łańcuchów molekularnych. Mikrosystemy umożliwiają badania zjawisk biologicznych na poziomie pojedynczych komórek, umożliwiając poznanie funkcjonowania systemów sygnalizacji wewnątrzkomórkowej, warto podkreślić że badania te wykonywane są z udziałem pracowników IPPT PAN w Warszawie [29]. Wiele układów mikroprzepływowych znajduje się w masowej produkcji i znalazło swoje zastosowanie w postaci laboratoryjnego sprzętu medycznego (cytometry, wielokomorowe układy powielania materiału genetycznego, miniaturowe czujniki poziomu cukru, analizy krwi, wykrywania bakterii) jak i do syntezy produktów chemicznych w mikroskali. Powstanie miniaturowanych układów

mikroprzepływowych stworzyło nowe wyzwania technologiczne w zakresie budowy układów i wyposażenia ich w mikroczipy biologiczne i chemiczne.

Zacznijmy omawianie miniaturyzacji mechaniki płynów od wydawałby się prostego układu o wymiarach milimetrowych. Z uwagi na małe wymiary, prędkości przepływu wskutek oporu lepkiego są również niewielkie i prawa rządzące takim przepływem wydają się proste, pozbawione matematycznych komplikacji równania Naviera-Stokesa (wz. 1). Prędkość płynu staje się proporcjonalna do przyłożonej siły (ciśnienia) a jej ruch daje się matematycznie opisać liniowym równaniem różniczkowym (*równ. Stokesa*), często z uwagi na powolny ruch cieczy zwanym równaniem smarowania. Małe prędkości przepływu to brak turbulencji odgrywającej podstawową rolę w procesach mieszania w skalach makro. Wobec tego zachowanie płynów w zminiaturyzowanych systemach przepływowych jest zdominowane przez dyfuzję. Ten powolny proces wymaga intensyfikacji, aby umożliwić zmieszanie płynów czy cząstek zawiesiny i przeprowadzenie reakcji w rozsądnym czasie. Modyfikując geometrię kanałów, wprowadzając dzielenie strumieni lub modulacje ścianek kanału stworzono narzędzia pozwalające zintensyfikować procesy mieszania i zrealizować funkcjonujące mikroreaktory, takie jak układ pokazany na rys. 12a.



Rys.12 Mikroreaktor wielokomorowy wyposażony w dozowniki, zawory i systemy kontroli temperatury [30] a) oraz generator mikrokropel wykorzystujący system mikroprzepływowy b) w laboratorium IChF PAN [31]

Opisywany równaniem Stokesa powolny przepływ, nazywany też pełzającym, w idealnych warunkach spełnia warunek pełnej odwracalności, czyli zmiana kierunku działania siły przywraca pierwotne położenie cząsteczek cieczy. I tu

pojawia się pierwszy problem, gdyż w takim systemie niemożliwe jest sterowanie ruchem płynu przez oddziaływania mechaniczne. Jak wobec tego kontrolować transport dla ruchów pozbawionych bezwładności, dlaczego mimo teoretycznego ograniczenia mikroorganizmy potrafią swobodnie przemieszczać się w płynach? Na te pytania udało się odpowiedzieć po wnikliwej analizie struktury ruchu generowanego przez obiekty biologiczne. Okazuje się, że skomplikowane ruchy rzęsek czy witek mikroorganizmów umożliwiają złamanie symetrii generowanych sił i w efekcie ich ruch pozwala na skuteczne przemieszczanie się w cieczy pierwotniaków czy bakterii. Wykorzystanie tej wiedzy jest konieczne, jeśli chcemy zrealizować jeden z celów nanotechnologii, jakim jest zbudowanie samonaprowadzających się kapsuł dostarczających leki do wybranych miejsc organizmu.

Oddziaływania hydrodynamiczne w mikroskali to jedna z wielu pojawiających się w przepływie sił. W miarę zmniejszania skali nabierają dużego znaczenia dodatkowe siły, ich znaczenie staje się tym większe im mniejsze skale ruchu rozpatrujemy. W pierwszej kolejności istotną a nierzadko decydującą rolę w małych skalach zaczynają odgrywać siły powierzchniowe wynikające z nie zrównoważonych oddziaływań molekularnych (van der Waalsa) na granicach rozdziálu dwóch ośrodków. Na ogół są to powierzchnie kanałów i powierzchnie między fazami (różne substancje, stany skupienia) przepływającej cieczy. Generowane efektami powierzchniowymi siły, zanedbywalnie małe w makroskali, mogą być przeszkodą w penetracji kanalików (brak zwilżania ścianek), siły te mogą być również wykorzystane do sterowania przepływem (połączenia układów o ściankach na przemian zwilżających i niezwilżających). Zmiany temperatury cieczy, składu chemicznego, koncentracji jonów (pH), czy też pola elektrycznego umożliwiają sterowanie siłami powierzchniowymi i tym samym sterowanie przepływem w systemie mikrokanałów. Napięcie powierzchniowe decyduje o wielkości dozowanych przez taki system mikrokropeł, a więc również jego zmiana jest wykorzystywana do dawkowania reagentów w mikroreaktorach. Wykorzystując oddziaływania hydrodynamiczne strumieni cieczy konstruowane są systemy pozwalające z dużą wydajnością generować identyczne krople, układy kropla w kropli jak i wielokrotności takich połączeń. Pokazany na rys 12b,

skonstruowany w polskim laboratorium układ do generacji mikrokropeł stwarza możliwość precyzyjnego sterowania reakcjami chemicznymi czy konstruowania kapsuł dostarczających dany materiał do analiz w systemach „lab-on-a-chip”.

Badania oddziaływań ciecz – ścianka w mikroskalach doprowadziły do odkrycia powierzchni „super-niezwilżalnych” (ang. super hydrophobic), tzn. takich dla których dzięki strukturze powierzchni siły odpychania molekuł wody znacznie przewyższają siły lokalnego ciśnienia. W mikrokanale o ściankach pokrytych substancją „super-niezwilżalną” ciecz przepływa niemal bez kontaktu ze ścianką, opory przepływu gwałtownie spadają i generowanie przepływu staje się możliwe nawet dla mikrometrowych średnic. Natura „odkryła” już dawno ten efekt i wykorzystuje go w transporcie płynów w organizmach. Podziwiamy też niektóre owady, które dzięki niezwilżającym pokryciom odnóg potrafią „chodzić” po powierzchni wody. Podobnie liście lotosu (ale i inne gatunki roślin) dzięki efektowi super-niezwilżalności pozostają zawsze czyste, gdyż mikrokrople tworzące się na niezwilżającej je powierzchni zbierają zanieczyszczenia i spływają nie pozostawiając śladów.

Zjawiska kontaktu cieczy ze ściankami kanałków rozpatrywane w skali mikronów mają nadal charakter zbliżony do tych, które znamy w skalach makro. Jednak dalsze zmniejszanie wymiaru charakterystycznego prowadzi już do zupełnie nowej interpretacji oddziaływań płyn – ścianka naczyń. Dla molekuł cieczy w skalach nanometrycznych ścianka naczyń to również zbiór mniej lub bardziej regularnie ułożonych molekuł. Na granicy płyn-ścianka w wyniku oddziaływań między molekułami mamy do czynienia ze zjawiskami tzw. poślizgu hydraulicznego, tzn. przepływ płynu nie spełnia podstawowej dla opisu makro hipotezy Newtona o zerowaniu się prędkości przepływu płynu lepkiego na ściankach kanałów. Wartość poślizgu mierzona jako odchylenie profilu prędkości przy ściance od wartości teoretycznej dla skal makro została zmierzona w szeregu eksperymentów i wynosi od kilku do kilkudziesięciu nanometrów. Wartość ta wyznacza skalę zjawisk dla których uwzględnienie poślizgu staje się istotne. Pojawiły się również doniesienia [32] wskazujące na możliwość pojawienia się konfiguracji, dla których ułożenie molekuł w stosunku do ścianek prowadzi do ruchu płynu, w którym praktycznie zanika opór. Efekt taki pojawia się dla molekuł wody transportowanych w nanorurkach węglowych, gdzie molekuły wody ułożone w postaci łańcucha monomerów przesuwają się wzdłuż osi nanorurki bez widocznych strat energii.

Obecność sił na granicy faz jest również podstawowym narzędziem pozwalającym na modyfikacje powierzchni. Wiele zastosowań znajdują ostatnio tzw. samoorganizujące się monowarstwy polimerowe możliwe do wytwarzania przez oddziaływanie przepływu zawiesiny cząstek nad modyfikowaną powierzchnią ścianki. Struktury takie znajdują zastosowanie w badaniach biologicznych pozwalając np. na wykrywanie specyficznych nukleotydów w analizie DNA, ale również do budowy kryształów fotonicznych i metamateriałów dla nanofotoniki. Tworzenie takich struktur wymaga opanowania metodyki manipulowania małymi objętościami płynu i kontrolowania ruchu nanocząstek przez tworzenie tzw. pułapek entropowych, tzn. miejsc dla których położenie nanocząstek będzie preferowane z uwagi na tzw. maksymalną entropię konfiguracyjną. Ruch cząstek w takich układach jest zdominowany przez dyfuzję a kierunek ich transportu wymaga obecności pewnego gradientu, np. koncentracji.

Pole elektryczne jest drugim obok oddziaływań powierzchniowych źródłem sił, które w skalach mikrometrowych znacznie zmieniają charakter przepływu. Niezależnie od zewnętrznego pola elektrycznego w płynie jak i w ściankach ograniczających pojawiają się niezerównoważone ładunki elektryczne. Są to zarówno jony, czyli molekuły o niedoborze lub nadmiarze elektronów jak i tzw. makroiony, tzn. makrocząsteczki obdarzone ładunkiem. W makroskali, przy braku zewnętrznych pól elektrycznych wpływ takich ładunków na ruch cieczy jest zanedbywalnie mały i ogranicza się to bardzo cienkiej warstwy na granicy ośrodków (np. ścianka i ciecz). Wymiar takiej warstwy, nazywanej podwójną warstwą elektryczną (ang. double diffusive layer) jest rzędu kilku do kilkudziesięciu nanometrów. W mikro skali istnienie warstwy podwójnej w zasadniczy sposób modyfikuje opis oddziaływania płynu ze ściankami kanału czy zawieszonymi w płynie mikroobiektami. Również tutaj zostaje naruszona zasada braku poślizgu płynu na granicy z ciałem stałym i przepływ cieczy zmienia swój charakter. Warto tutaj wspomnieć o doniosłym wkładzie polskiego fizyka Mariana Smoluchowskiego, który na początku XX wieku przedstawił teoretyczne modele zarówno dla opisu przepływu elektrokinetycznego jak i dla ruchów Browna.

Istnienie podwójnej warstwy elektrycznej ma istotne znaczenie praktyczne dla mechaniki płynów w skalach mikro. Większość systemów mikroprzepływowych

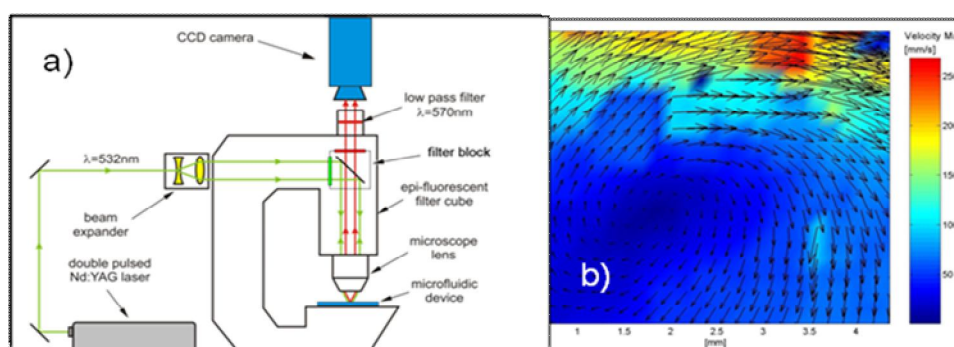
bazuje na dwóch metodach wymuszania przepływu: *ciśnieniowym* i *elektrokinetycznym*. *Ciśnieniowy system* transportu płynu czyli znane w skali makro pompy i zbiorniki ciśnienia stają się wysoce niewydajne w skali mikro. Z uwagi na małe wymiary kanałów potęgowo rosnące opory przepływu uniemożliwiają stosowanie systemu ciśnieniowego w skalach mikrometrowych. Pozostającą alternatywą jest *system elektrokinetyczny*, w którym elementu płynu „ślizgają się” po cienkiej *warstwie podwójnej* eliminując w dużym stopniu straty wywołane oporem lepkim. Jednak najszerszym polem zastosowań elektrokinetyki w mikrosystemach jest elektroforeza, czyli wykorzystanie możliwości sterowania ruchem i separowania mikrocząstek zawieszonych w cieczy. Metody te są powszechnie stosowane w biologii i medycynie, między innymi do identyfikacji DNA.

Warto wspomnieć również o polu magnetycznym, którego oddziaływanie z płynami w skali makro umożliwia sterowanie przepływem, zarówno dla ferromagnetyków, gdzie oddziaływania są bardzo silne jak i paramagnetyków, czyli większości cieczy i gazów. W skali mikro pole magnetyczne stosowane jest m.in. do manipulowania mikro i nanocząstkami zawieszonymi w przepływie. Prowadzone są badania nad wykorzystaniem tych efektów dla docelowej terapii, tzn. dostarczania leku czy materiału niszczącego nowotwór sterując jego ruchem w płynach fizjologicznych [33].

Postęp, jaki obserwujemy w ciągu ostatnich dwudziestu lat w badaniach biologicznych, a szczególnie w biologii molekularnej zawdzięczamy między innymi stworzeniu mikrosystemów pozwalających na zautomatyzowanie procedur diagnostycznych i równoległe analizowanie tysięcy próbek jednocześnie. Budowa takich układów wymaga zarówno wiedzy o zjawiskach chemicznych, optycznych jak i przepływowych, tak aby w optymalny sposób doprowadzić do miejsca reakcji pikolitrowe drobiny cieczy czy materiału biologicznego, zapewnić w odpowiednich warunkach i czasie prawidłowy przebieg reakcji, stworzyć układ detekcji produktów i umożliwić usunięcie zbędnych produktów. Czynność ta może być realizowana tysiące razy, co oznacza konieczność pełnej powtarzalności przebiegu zjawisk. Planowanie i optymalizacja takich układów wymaga stworzenia odpowiedniej metodyki projektowania, opartej na modelowaniu komputerowym i weryfikacji eksperymentalnej. Zarówno jedno jak i drugie stanowi dla mechaniki płynów nowe wezwanie. Pomiar parametrów przepływowych i sterowanie

przepływem w skalach mikrometrowych nie jest łatwe i wymaga stworzenia specjalistycznych narzędzi, sięgnięcia po zupełnie nowe metody eksperymentalne, często będące modyfikacją systemów znanych wcześniej w badaniach biomedycznych, jak mikroskopia fluorescencyjna, mikroskopia skaningowa, czy w ostatnich latach metody detekcji molekularnej jak rezonansowy przekaz energii fluorescencji (FRET) i plazmonowe odbicie światła na nanowarstwach metali.

Podstawową wielkością, która opisuje ruch płynu jest oczywiście pole prędkości. Pomiar prędkości płynu wbrew pozorom nie jest trywialny i w większości przypadków opiera się na pośrednich informacjach takich jak wpływ opływu na odbiór ciepła z sondy (termo-anemometria), zmiana ciśnienia w opływanych czujniku, zmiana prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej, czy wreszcie detekcja ruchu wtrącenia unoszonego przez płyn (np. zawiesiny czy znakowanej molekuly). Każda z metod ma bogatą historię, zalety i wady. W badaniach mikroprzepływowych niewątpliwie przełom stanowiła modyfikacja stosowanej od lat w skali makrometody anemometrii obrazowej PIV (Particle Image Velocimetry). Metoda ta pozwala zmierzyć dwie lub trzy składowe wektora prędkości dla całego przekroju pola przepływu, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i dla opływu dużych obiektów, jak samochód czy wirnik śmigłowca. Wykorzystując korelację kolejnych obrazów przemieszczających się w przepływie cząstek rozpraszających światło uzyskuje się niezbędną informację o ruchu



Rys. 13. Schemat stanowiska pomiarowego *micro-PIV* zbudowanego w laboratorium IPPT PAN a) i typowe pole prędkości otrzymane tą metodą b)

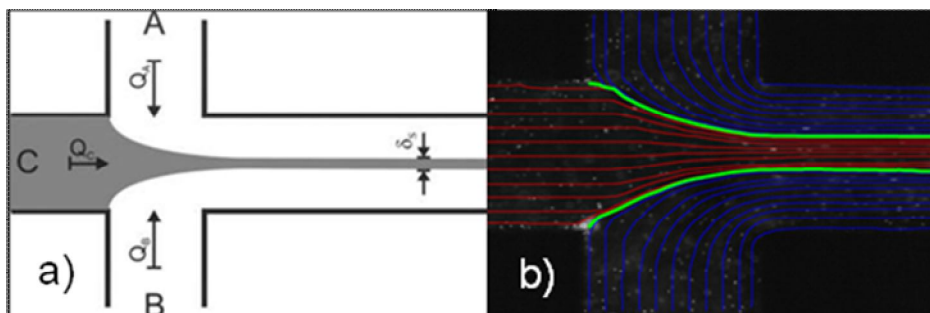
płynu. W skali mikro detekcja cząstek wskaźnikowych i separacja informacji od innych zakłóceń optycznych praktycznie wyklucza stosowanie standardowej

techniki PIV i dlatego zastosowano cząstki fluorescencyjne jako tzw. posiew znacznikowy. Wskutek wzbudzonej fluorescencji cząstek możliwe jest odfiltrowanie ich świecenia o zmienionej w stosunku do światła padającego długości fali i identyfikacja położenia cząstek, nawet jeśli rejestrowany obiekt ma postać jedynie rozmytego krążka dyfrakcyjnego. Położenie cząstki identyfikuje się przez wyznaczenie środka obrazu dyfrakcyjnego, a zamiana położenia dla kolejnych obrazów to szukane pole prędkości. Metoda ta nazwana *micro-PIV* pozwala badać nie tylko ruch cieczy w skomplikowanych systemach mikroprzepływowych ale również „*in vivo*”, np. w cytoplazmie komórek czy w sercu zarodka kurczaka [34]. Informacja o całym polu prędkości, jaką oferuje metoda PIV jest niezastąpiona zarówno dla prawidłowej interpretacji występujących tam, często skomplikowanych struktur, ale przede wszystkim dla uwiarygodnienia budowanych modeli numerycznych.

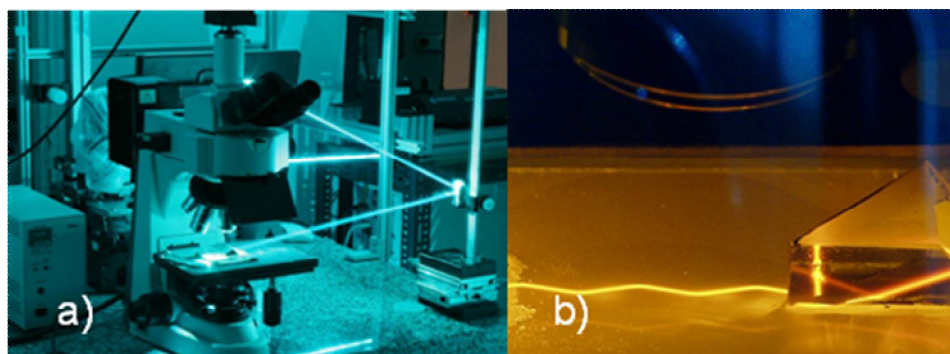
Rysunek 13a pokazuje schemat systemu oświetleniowego używanego w laboratorium IPPT PAN. Światło zielonego lasera (532 nm) jest kierowane do wewnętrznego toru optycznego mikroskopu, gdzie przez blok filtrów i obiektyw mikroskopu dociera do analizowanego przepływu oświetlając fluorescencyjne cząstki znacznikowe w nim zawarte. Cząstki te, po wzbudzeniu, emitują światło czerwone (612 nm), które podlega rejestracji kamerą cyfrową. Światło zielone, odbite od ścianek kanału i cząstek znacznikowych, jest odcięte przez układ filtrów i nie jest rejestrowane przez kamerę. Przykładowy wynik pomiaru uzyskany przy pomocy tej aparatury pokazano na rys. 13b, strzałki oznaczają kierunki ruchu cząstek znacznikowych zawieszonych w płynie, natomiast kolory oznaczają wartość prędkości (kolor czerwony to prędkość maksymalna a niebieski minimalna).

W mikroprzepływach często istnieje konieczność sterowania położeniem cząstek w przekroju kanału. Jedną z metod jest sterowanie polem przepływu tak, aby poruszające się jako zawiesina cząstki gromadziły się wskutek oddziaływań hydrodynamicznych w wybranym obszarze. Efekt migracji cząstek wskutek oddziaływań hydrodynamicznych został po raz pierwszy zaobserwowanych w 1929 roku przez lekarzy Fahraeusa i Linquista podczas badań koncentracji krwinek w kapilarach. Analiza tego efektu pozwoliła m.in. zrozumieć przyczynę spadku

oporów przepływu krwi w małych naczyniach. Krwinki poruszające się w takim przepływie odsuwają się od ścianek i cienka warstwa smarująca plazmy znakomicie ułatwia przepływ krwi. W laboratoriach biologicznych i mikroprzepływowych wykorzystuje się podobne zjawisko, wykorzystując dwa strumienie cieczy i odpowiednio formując przepływ tak, aby jednym ze strumieni ścisnąć (zogniskować) główny przepływ w wybranym miejscu kanału, co pokazano na schemacie z rys. 14a.



Rys. 14. Schemat układu do ogniskowania przepływu a) i zarejestrowane torry cząstek fluorescencyjnych ogniskowanych w przepływie b)



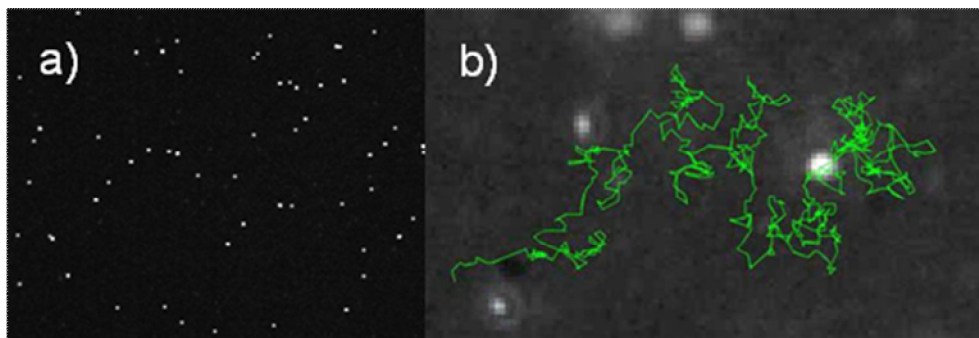
Rys. 15. Stanowisko do badania przepływu w warstwie przyściennej mikrokanalu wykorzystujące falę biegnącą a) oraz zbliżenie wiązki lasera wprowadzonej za pomocą pryzmatu do wnętrza ścianki mikrokanalu i biegnącej w tej ściance wskutek wielokrotnego całkowitego wewnętrznego odbicia światła b).

Takie ogniskowanie przepływu umożliwia separację cząstek czy komórek tak, aby znajdowały się tylko w wybranej, analizowanej płaszczyźnie przepływu, której położenie i grubość mogą być sterowane poprzez zadanie odpowiednich wydatków

strumieni skupiających, pokazano to na obrazie uzyskanym w laboratorium IPPT PAN metodą *micro-PIV* (rys. 14b). Ogniskowanie przepływu pozwala m.in. na precyzyjną analizę poruszających się przed detektorem pojedynczych komórek biologicznych (cystometria przepływowa), przeprowadzenie kontrolowanej reakcji dwóch składników czy też wybór obszaru do analizy pola prędkości przez zogniskowanie w wybranej warstwie cząstek wskaźnikowych posiewu.

Obserwacja przepływu w pobliżu ścianki kanału, istotna w badaniach oddziaływań biologicznych i chemicznych, może być znacznie ułatwiona poprzez ograniczenie penetracji światła laserowego w głąb kanału. W tym celu wykorzystuje się zjawisko oparte na fali biegnącej, powstającej przy całkowitym wewnętrznym odbiciu światła na granicy dwóch ośrodków o różnym współczynniku załamania światła (*ang. Total Internal Reflection – TIR*). Do górnej szklanej ścianki kanału wprowadzamy przy użyciu pryzmatu lub specjalnie skonstruowanego obiektywu skupioną wiązkę światła laserowego w taki sposób, aby padała ona na wewnętrzne powierzchnie tej ścianki pod kątem większym niż kąt całkowitego wewnętrznego odbicia światła dla granicy ośrodków szkło-woda i szkło-powietrze, co pokazano na rys. 15. W ten sposób otrzymujemy wiązkę lasera „uwięzioną” w ściance kanału (biegnącą w nim jak w światłowodzie). Całkowitemu wewnętrznemu odbiciu światła na granicy dwóch ośrodków towarzyszy zjawisko powstawania szybko zanikającej fali biegnącej, tworzącej się w miejscu tego odbicia i penetrującej „drugi” ośrodek na głębokość rzędu tylko kilkudziesięciu nanometrów. Dzięki temu możliwe jest oświetlenie fluorescencyjnych obiektów, nanocząstek metali czy cząstek znacznikowych znajdujących się jedynie w warstwie przyściennej przepływu.

Obserwacje przepływu odbywają się przez umieszczenie osi obiektywu mikroskopu nad jednym z punktów całkowitego odbicia światła, gdyż jedynie tam ciecz jest oświetlana w warstwie o grubości kilkudziesięciu nanometrów w pobliżu ścianki kanału. Taki system oświetlenia jest stosowany m.in. do analizy przepływów i ruchów Browna w pobliżu ścianki kanału, wykorzystując nanocząstki fluorescencyjne i tzw. kropki kwantowe [50].



Rys. 16. Nanocząstki srebra o średnicy ok. 60nm; a) i ruchy Browna nanocząstki zarejestrowane pod mikroskopem w IPPT PAN b)

Śledzenie chaotycznych ruchów nanocząstek w cieczy pokazane na rys. 16 stwarza możliwość pomiaru w mikronowych skalach własności fizycznych cieczy, takich jak np. stała dyfuzji, własności reologiczne czy lokalna lepkość dla minimalnych ilości płynu jaki znajduje się np. wewnątrz komórki czy nawet wewnątrz jądra komórkowego.

Nanocząstki to jedne z wielu „ponownych odkryć” związanych z nanotechnologiami. Występowanie nanocząstek wokół nas jest powszechne, choćby w spalinach samochodowych. Ich praktyczne wykorzystanie też nie jest całkowitą nowością. Jednak zainteresowanie nanocząstkami znacznie wzrosło w ostatnich latach, kiedy odkryto ich bioaktywność. Zaczęto je również wykorzystywać do produkcji nowych materiałów, tworzenia nanowarstw, transportu leków czy manipulacji wiązaniami białkowymi. Nanocząstki stanowią też istotny materiał diagnostyczny w mikroprzepływach. Mogą być wskaźnikiem pozwalającym rejestrować ruch i mierzyć własności otaczającego je ośrodka, jak również modyfikować własności płynu, w którym są zawieszone. Jak pokazują ostatnie badania, dodanie do typowej cieczy niewielkiej domieszki nanocząstek może istotnie zmienić jej makroskopowe własności, na przykład przewodnictwo cieplne takiej cieczy wzrasta nawet o dwa rzędy wielkości. Choć do tej pory nie ma jednoznacznej interpretacji fizycznej tego zjawiska, wykorzystanie tego efektu może mieć olbrzymie znaczenie praktyczne, szczególnie w systemach chłodzenia mikroelektroniki.

Największym jednak wyzwaniem stawianym mikro i nanomechanice płynów przez biofizyków i biochemików jest zrozumienie mechanizmu fałdowania długich łańcuchów molekuł białek i DNA oraz ich transportu przez nanopory w błonie komórkowej. Zagadnienia te są w chwili obecnej najbardziej „gorącym” tematem badawczym w świecie, nad wyjaśnieniem tej zagadki pracują także polscy naukowcy, o czym przekonać może także i lektura strony internetowej Sekcji Mechaniki Płynów Komitetu Mechaniki PAN [38].

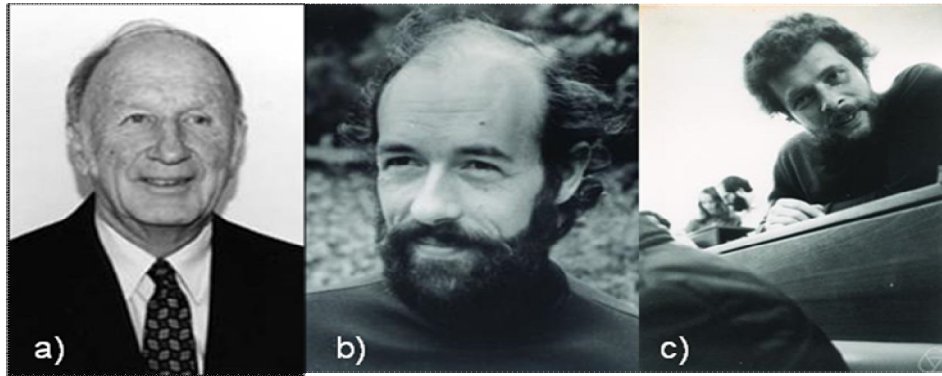
4. Spojrzenie w przyszłość – wyzwania stojące przed mechaniką płynów

Wprowadzenie do praktyki inżynierskiej oprogramowania do komputerowego modelowania przepływów (CFD) nie tylko ułatwiło pracę inżynierom, lecz także w znacznym stopniu zatarło różnice między pracą inżyniera i naukowca. Do niedawna jedynie naukowcy zajmowali się rozwiązywaniem równań i tworzeniem uproszczonych rozwiązań i teorii, natomiast inżynierowie wykorzystywali te rozwiązania dla tworzenia konstrukcji. Dziś inżynier zajmujący się modelowaniem aerodynamiki samolotu czy samochodu nie korzysta z gotowych i sprawdzonych przez specjalistów rozwiązań, lecz korzystając z oprogramowania CFD sam rozwiązuje układ równań Reynoldsa (wz. 2). Do prawidłowego rozwiązania tak złożonych równań potrzebna jest znajomość technik numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych, formułowania warunków brzegowych i wielu zagadnień, którymi kiedyś zajmowali się tylko matematycy oraz specjaliści z mechaniki płynów. Narzędzia programistyczne CFD zawierają, co prawda, kompletne katalogi warunków brzegowych i technik rozwiązywania równań, lecz wybór należy zawsze do użytkownika, który musi dysponować niezbędną do tego wiedzą. W modelowaniu komputerowym obowiązuje „od zawsze” zasada „*śmieci na wejściu – śmieci na wyjściu*” (ang. *garbage in – garbage out*) co oznacza, że źle sformułowany problem prowadzi do równie złych wyników. Zastosowanie oprogramowania CFD ułatwiło pracę inżyniera poprzez odciążenie od czasochłonnych czynności związanych z uzyskiwaniem rozwiązań, lecz jednocześnie bardzo zwiększyło zakres wiedzy niezbędnej do prawidłowego i

odpowiedzialnego wykorzystania nowych narzędzi modelowania komputerowego. Ten rodzaj działalności technicznej stał się w znacznie większym niż do tej pory stopniu „działalnością inżynierską opartą na wiedzy” (ang. *knowledge based engineering*) i to stwierdzenie stanowi dziś **pierwsze z wyzwań stojących przed mechaniką płynów**. Rozwój narzędzi wspomagania pracy inżyniera takich jak CFD jest wyzwaniem dla nauki a wdrożenie ich do praktyki inżynierskiej poprzez zatrudnienie wysoko wykształconych specjalistów jest z kolei warunkiem konkurencyjności wszystkich gałęzi przemysłu. Warunkiem sukcesu jest wykształcenie specjalistów, należy jednak pamiętać, że zdobycie wiedzy niezbędnej do odpowiedzialnego używania narzędzi CFD wymaga dziś najczęściej ukończenia studiów III stopnia (doktoranckich), gdyż zakres wiedzy potrzebnej specjalistom z zakresu CFD znacznie przekracza program studiów magisterskich. Świadomość wagi problemu była przyczyną powołania szeregu organizacji służących rozwojowi i popularyzacji narzędzi CAE, z których wymienić należy NAFEMS [35], powołaną w r. 1983 z finansowym wsparciem rządu W. Brytanii oraz ERCOFTAC [36], powstałą w r. 1988 z inicjatywy szeregu uczelni i organizacji przemysłowych. W kraju zajmuje się tym Sekcja Mechaniki Płynów Komitetu Mechaniki PAN [37] oraz Polskie Centrum Pilotowe ERCOFTAC [38].

Kolejne, **drugie wyzwanie dla mechaniki płynów**, to nowe metody modelowania przepływów oparte o osiągnięcia nowej dziedziny matematyki zwanej „teorią chaosu” [39]. Teoria ta po raz pierwszy sformułowana została przez francuskiego matematyka Henri Poincare (1854-1912) [40], jednak dla mechaniki płynów zaczęła być interesująca w roku 1961 za sprawą amerykańskiego matematyka i meteorologa Edwarda Lorenza (1917-2008) [41]. E. Lorenz (rys. 17a) próbując przewidzieć pogodę z pomocą modelu komputerowego zauważył, że podstawienie do komputera danych różniących się na czwartym miejscu po przecinku (0.506 zamiast 0.506127) spowodowało, że wyliczona przez komputer prognoza pogody zmieniała się radykalnie. Systematyczne studia tego przypadku doprowadziły Lorenza do szeregu ważnych odkryć, które początkowo były zrozumiałe jedynie dla matematyków, lecz całkiem niespodziewanie zostały spopularyzowane zostały przez wygłoszony przez E. Lorenza w r. 1972 odczyt „Czy przelot motyla w Brazylii może wywołać tornado w Teksasie ?” [39]. Dziś

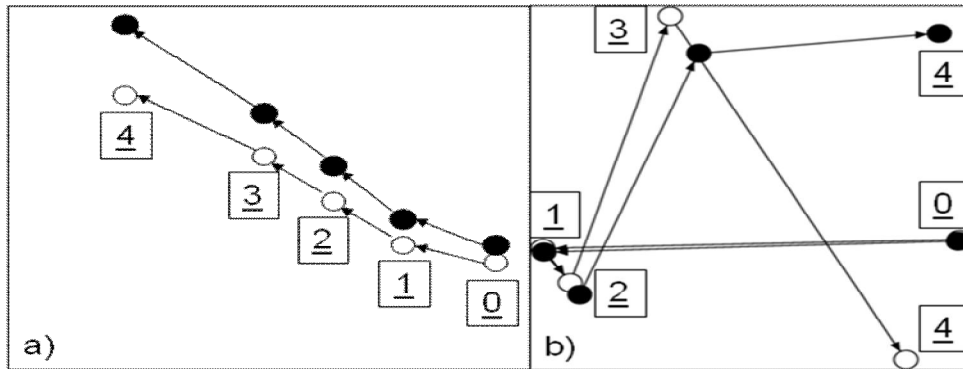
znamy to zjawisko jako „*efekt motyla*” [42], ilustrujący niezwykle wrażliwość przepływów turbulentnych na tak niewielkie zakłócenia warunków początkowych jak zmiany wywołane machnięciem skrzydeł motyla. Dzięki dalszym odkryciom walońskiego (tj. francuskojęzycznego) Belga Dawida Ruelle [43] i Holendra Florisa Takensa [44] (dziś słynnych, emerytowanych profesorów matematyki – patrz rys. 17b i c) powstał w ten sposób nowy opis turbulencji oparty o teorię chaosu.



Rys. 17. Autorzy nowego ujęcia turbulencji opartego na teorii chaosu, poczynając od E. Lorenza a), poprzez D. Ruelle b) do F. Takensa c) [41, 43, 44].

Dla zrozumienia wagi tego odkrycia należy cofnąć się do prac O. Reynoldsa, który stwierdził, że równanie N-S (wz.1) może opisywać jedynie uporządkowany ruch laminarny, natomiast do opisu nieuporządkowanego ruchu turbulentnego potrzebne jest inne równanie (wz. 2), znane dziś jako równanie Reynoldsa. Stwierdzenie to wynikało z ówczesnej wiedzy o naturze równań i przeświadczenia, że każde „dobrze wychowane” równanie zachowuje się w sposób względnie uporządkowany i przewidywalny. Przyjmijmy, że w pokazanym na rys. 18a fragmencie przepływu wyróżnimy dwie małe objętości płynu, oznaczone jako kule biała i czarna, które w chwili początkowej, oznaczonej na rys. 18 symbolem „0” znajdują się blisko siebie. W kolejnym kroku czasowym (np. po upływie 1 sekundy) obydwie kule znajdą się w położeniu „1” w nieco większej (lub mniejszej) odległości i tak samo logicznie i regularnie będą zachowywać się w krokach następnych. Uzasadnieniem takich oczekiwań jest równanie N-S, które jako wniosek z praw dynamiki Newtona uwzględniać musi fakt, że każdej naglej

zmianie kierunku i prędkości „sprzeciwiać” będzie się siła bezwładności, tym większa im większe jest chwilowe przyspieszenie. Jeśli zatem równanie N–S opisywało laminarny ruch płynu, oznaczało to, że było to równanie „dobrze wychowane” i z tego chociażby powodu nie mogło ono opisywać nieuporządkowanego ruchu turbulentnego. Odkrycie Lorenza pokazywało jednak, że wiele równań które wydawały się być „dobrze wychowane” zachowuje się inaczej, co pokazuje przykład z rys. 18b, gdzie dwie kule płynu startujące w chwili „0” z bardzo bliskich sobie miejsc, po kilku krokach zaczynają oddalać się od siebie i już w chwili „4” wędrują w przeciwnne strony.



Rys. 18. Ilustracja wrażliwości na zmiany warunków początkowych charakterystyczne dla regularnego a) i chaotycznego b) zachowania równań [39]

Takie zachowanie układu nazywa się „chaotycznym” i jest to również cechą przepływów turbulentnych. Prace wspomnianych już D. Ruelle i F. Takensa z r. 1977 wykazały, że równanie N–S (wz. 1) w pewnych warunkach zachowuje się „chaotycznie”, co oznacza, że może ono opisywać nie tylko ruch laminarny lecz także i turbulentny. Od tej chwili równanie N–S przestało być tylko domeną matematyków i zaczęło się nim interesować coraz więcej mechaników płynów, pragnących znaleźć uniwersalne narzędzie opisu wszystkich typów przepływów. Rozwiązanie równania N–S wymagało jednak gigantycznych komputerów, gdyż wielkoskalowość (patrz rozdz. 2) przepływów turbulentnych wymagała, aby w całym rozwiązywanym obszarze przepływu siatka węzłów numerycznych była rozmieszczona z gęstością odpowiadającą najmniejszym turbulentnym wirom. W latach 80’ komputery „urośli” na tyle, że możliwe stało się uzyskanie rozwiązania

dla przepływu turbulentnego metodą bezpośredniego (numerycznego) scałkowania równania N–S. Po raz pierwszy udało się to Parvizowi Moinowi, obecnie profesorowi Uniwersytetu Stanforda i dyrektorowi Center for Turbulence Research w NASA Ames Research Centre [45]. Prof. P. Moin i grupa jego współpracowników stworzyli w ten sposób nową metodę komputerowej symulacji przepływu turbulentnego znaną jako DNS (**D**irect **N**umerical **S**imulation) [46], która pozwala mechanice płynów wrócić do źródła, jakim jest równanie N–S. Czy jest to zatem kres rozwoju mechaniki płynów? – na szczęście nie (dla specjalistów mechaniki płynów, którzy staliby się bezrobotni), bo ciągle jeszcze moce obliczeniowe komputerów są dalece niewystarczające dla potrzeb DNS. Aby to uzasadnić, wróćmy do przykładu komputerowych prognoz pogody przygotowywanych przez ICM [18], które choć bardzo dobre to ciągle nie są na tyle dokładne, aby przewidzieć ze 100% pewnością, o której godzinie spadnie jutro deszcz. Wiemy, że zastosowanie DNS z pewnością pozwoliłoby przewidzieć dokładną godzinę, kiedy potrzebny nam będzie parasol, założmy też że mamy do dyspozycji najpotężniejszy budowany obecnie superkomputer Sequoia [48] wyposażony w ponad 1.5 miliona procesorów (choć naprawdę komputer ten będzie uruchomiony dopiero w roku 2011). Założmy także, że będzie nas stać na zapłacenie rachunku za energię elektryczną, bo przecież komputer ten konsumuje co godzina 6 tysięcy kilowatogodzin (z których każda kosztuje nas około 30 groszy). Okazuje się jednak, że na wynik obliczeń stuprocentowo dokładnej prognozy pogody na dzień jutrzejszy musielibyśmy czekać kilkadziesiąt lat, co oznacza, że DNS jest ciągle bardzo odległą perspektywą i musimy włożyć bardzo wiele pracy w usprawnienie tej metody. Mamy już tu spore sukcesy a zawdzięczamy to wspomnianemu już w rozdz. 2 Andrejowi Kołmogorowowi [16] i amerykańskiemu meteorologowi Josephowi Smagorinskiemu (1924-2005) [47]. Odkrycia obydwu uczonych, choć odległe w czasie o kilkadziesiąt lat, pozwoliły stworzyć znacznie szybszą (choć mniej dokładną) metodę rozwiązywania równań N–S, znaną dziś jako LES (**L**arge **E**ddy **S**imulation) [48], która już dziś wykazała użyteczność w wielu dziedzinach techniki, na przykład w obliczeniach hałasu aerodynamicznego samolotów i samochodów (zainteresowanych odsyłamy do naszego referatu wygłoszonego z okazji pięćdziesięciolecia Komitetu Mechaniki

PAN [37]). Metody DNS i LES rozwijają się na naszych oczach, gdyż potrzebne są do opisu zjawisk, które w języku polskim nazywane są „sprzężonymi” a w języku angielskim nazywane są „*multiphysics*” (np. mechanika płynów + hałas, mechanika płynów + reakcje chemiczne).

Trzecie wyzwanie dla mechaniki płynów pojawiło się z chwilą, gdy mechanika płynów zaczęła zajmować się przepływami o tak małych rozmiarach, że zaczęły być one porównywalne z wielkością molekuł płynu i wówczas fundamentalne dla mechaniki płynów równanie N–S nie mogło być dalej stosowane. Konieczne stało się wówczas nie tylko uwzględnienie obecności molekuł płynu, lecz także i wzajemnych między nimi oddziaływań. Pionierem tego typu symulacji był angielski matematyk John Bernal (1901 – 1971) [51], który opowiedział, że „...w roku 1962 próbowałem zbudować model płynu odtwarzając jego strukturę jako zbiór gumowych piłek połączonych prętami, w czym przeszkadzał mi co kilka minut dzwonek telefonu...dziś na szczęście możemy wykorzystać do tego celu komputery...”. Taki sposób modelowania własności płynu, wykorzystujący znajomość sił wzajemnego oddziaływania molekuł i nazywany „dynamiką molekularną” jest dziś wykorzystywany w mikro i nanomechanice jako podstawowe narzędzie badawcze [52]. Wiemy jak opisać ruch molekuł płynu i teoretycznie mając pełny opis konfiguracji i molekuł możemy przewidzieć dynamikę modelowanego mikrosystemu. Jednak podobnie jak to wcześniej powiedzieliśmy o możliwości otrzymania numerycznego rozwiązywania równań Naviera-Stokesa w skalach makro, pełne rozwiązania w skalach atomowych wymagają nieosiągalnych dziś mocy obliczeniowych a czas obliczeń przekracza nawet dla milimetrowych wymiarów systemów setki lat. Z tego względu zarówno mechanika kwantowa dla modelowania oddziaływań międzymolekularnych jak i dynamika newtonowska stosowana do modelowania ruchu molekuł do rozwiązywania specyficznych zagadnień, np. zrozumienia wpływu skali w analizowanym mikroprzepływie. Rozwiązanie praktycznego problemu np. zaprojektowania mikroreaktora wymaga sprzęgnięcia klasycznej hydrodynamiki ze zmodyfikowanym wpływem skali opisem sił działających na cząsteczki i płyn. Jednym z rozwiązań jest stosowanie modeli gruboskalowych (*coarse grain*), gdzie uśrednione oddziaływania przypisuje się zespołom molekuł a

wpływ stochastycznego charakteru ruchu w skalach nano uzyskuje się odpowiednio modyfikując równania ruchu. Walidacja takiego przybliżenia wymaga jednak dokładnego porównania z doświadczeniem, co w nanoskalach nie jest zagadnieniem trywialnym i wymaga technik znacznie wykraczających poza klasyczne metody pomiarowe mechaniki płynów. Ciągły rozwój nowych technik eksperymentalnych i numerycznych jaki obserwujemy pozwala mieć nadzieję, że już w ciągu najbliższego dziesięciolecia projektowanie systemów mikroprzepływowych z uwzględnieniem fizyki i chemii zjawisk w skalach molekularnych stanie się możliwe.

Autorzy mają nadzieję, że udało się przekonać Czytelników, że mechanika płynów zarówno w skali makro jak i mikro oraz nano to nauka żywa, która czerpiąc doświadczenia z ponad stuletniej historii tworzy nowe metody i teorie. Warto również zwrócić uwagę, że rozwój mechaniki płynów wynika nie tylko z ciekawości naukowców, lecz także (a właściwie przede wszystkim) z potrzeb przemysłu, dla którego mechanika płynów tworzy nowe „oparte na wiedzy” technologie.

Literatura:

1. <http://www.claymath.org/millennium/>
2. <http://en.wikipedia.org/wiki/Prandtl>
3. http://en.wikipedia.org/wiki/Direct_numerical_simulation
4. http://en.wikipedia.org/wiki/Humphrey_Bogart
5. M. van Dyke, An Album of Fluid Motion, The Parabolic Press, Stanford, USA, 1982
6. H. Tennekes, J. L. Lumley, A First Course in Turbulence, MIT Press, 1972
7. O. Reynolds, Phil. Trans. R. Soc., vol. 174, 1883
8. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Windkanal.jpg>
9. <http://en.wikipedia.org/wiki/MD-80>
10. http://en.wikipedia.org/wiki/File:Man_examining_fan_of_Langley_Research_Center_16_foot_transonic_wind_tunnel.jpg
11. <http://www.cntpolska.pl/index.php/2010-01-13-00-33-11/laboratorium-aerodynamiki-stosowanej>
12. <http://en.wikipedia.org/wiki/Airfoil>
13. Liebeck, R. H., Design of subsonic airfoils for high lift, J. Aircr., 1978. No 15, str. 547-61.
14. <http://www.ls-flugzeugbau.de/inh-ls10-e.html>

15. FLUENT Newsletter
16. <http://en.wikipedia.org/wiki/Kolmogorov>
17. <http://en.wikipedia.org/wiki/Turbulence>
18. http://en.wikipedia.org/wiki/Swiss_Re_Building
19. http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclone_Catarina
20. <http://new.meteo.pl/>
21. <http://www.imc.pcz.czest.pl/institut/pl/index.html>
22. <http://www.itc.polsl.pl/newitc/index.php>
23. http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_Fluid_Dynamics
24. <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>, Richard P. Feynman, There's Plenty of Room at the Bottom,
25. http://en.wikipedia.org/wiki/Nano_sciences
26. Nanotechnologie, red. R. W. Kelsall, I. W. Hamley, M. Geogheagan, red. tłumacz. K. Kurzydłowski, PWN, 2008.
27. <http://en.wikipedia.org/wiki/Microfluidics>
28. <http://en.wikipedia.org/wiki/Lab-on-a-chip>
29. S. Tay, J. J. Hughey, T. K. Lee, T. Lipniacki, S. R. Quake, M. W. Covert, Single-cell NF- κ B dynamics reveal digital activation and analog information processing, *Nature* 2010 (w druku)
30. G.M. Whitesides, Overview The origins and the future of microfluidics, *Nature* 442, 2006, str. 368-373,
31. Garstecki P., Ganan-Calvo A.M., Whitesides G.M., Formation of bubbles and droplets in microfluidic systems, *Bull. Pol. Acad. Scs. , Tech. Scs.* 52, 2004, str. 361-371,
32. M. Mainak, Ch. Nitin, A. Rodney, J.H. Bruce, Nanoscale hydrodynamics: Enhanced flow in carbon nanotubes, *Nature* 438, 2005, str. 44-46,
33. P. C. Morais, From magnetic fluids up to complex biocompatible nanosized magnetic systems, *Bull. Pol. Acad. Scs., Tech Scs.*, 2008, 56, str. 253 – 262,
34. P. Vennemann, J. Westerweel, Full-Field Blood Velocity Measurement Techniques, w *Abiomed Lecture Notes 6 Blood Flow Modelling and Diagnostics*, red. T. Kowalewski, wyd. IPPT PAN, Warszawa 2005, str. 91-108
35. <http://www.nafems.org/>
36. <http://projects.streamsys.be/ercoftac/>
37. <http://www.kmech.pan.pl/>
38. <http://fluid.ippt.gov.pl/kmp/>
39. http://en.wikipedia.org/wiki/Chaos_theory
40. http://en.wikipedia.org/wiki/Henri_Poincar%C3%A9
41. http://en.wikipedia.org/wiki/Edward_Lorenz
42. http://en.wikipedia.org/wiki/Butterfly_effect
43. http://en.wikipedia.org/wiki/David_Ruelle
44. http://en.wikipedia.org/wiki/Floris_Takens
45. http://en.wikipedia.org/wiki/Parviz_Moin

46. http://en.wikipedia.org/wiki/Direct_numerical_simulation
47. http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Smagorinsky
48. http://en.wikipedia.org/wiki/Large_eddy_simulation
49. http://en.wikipedia.org/wiki/IBM_Sequoia
50. http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_dot
51. http://en.wikipedia.org/wiki/J.D._Bernal
52. http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_dynamics