

Klaudia MAZUR\*

DOI: [https://doi.org/JoT2021\\_06](https://doi.org/JoT2021_06)

## ANALIZA NUMERYCZNA SPADKU CIŚNIENIA W ZAWORZE MAKSYMALNYM UKŁADU SMAROWANIA POJAZDÓW SPALINOWYCH

**Słowa kluczowe:** *zawór maksymalny, spadek ciśnienia, straty ciśnienia, analiza numeryczna mechaniki płynów*

W poniższej pracy przedstawiono analizę przepływu oleju przez zawór przelewowy typu UDZB firmy PONAR Wadowice wykorzystywany w układach smarowania. Ma to na celu przedstawienie zachodzących zjawisk podczas zmiany wielkości szczeliny w zaworze. W pracy zawarte są informacje dotyczące spadku ciśnienia – czym jest spowodowany oraz jakie mogą być jego skutki.

### 1. WSTĘP

Silniki spalinowe są eksploatowane na całym świecie w różnego rodzaju pojazdach motoryzacyjnych. Mimo iż w dobie ograniczeń jakie są stawiane producentom pojazdów związane z emisją spalin silniki te jeszcze przez długi czas nie przestaną być produkowane. Spowodowane jest to tym, że pojazdy elektryczne nie są i jeszcze długo nie będą ogólnie dostępne między innymi ze względu na problem z dostępem do ładowania. Nie zapewniają one także swobody przemieszczania się na dłuższe odległości – w przeciwieństwie do pojazdów wyposażonych w silniki spalinowe, które wciąż mają niewykorzystany potencjał. Firmy transportowe zajmujące się dostawami na duże odległości korzystają z aut wyposażonych właśnie w silniki spalinowe. Aby mechanizm ten sprawnie działał musi zawierać między innymi układ smarowania. Zawór maksymalny wykorzystywany w układzie smarowania silników spalinowych ma za zadanie zabezpieczyć ten zespół przed jego ewentualnym zniszczeniem podczas nagłego wzrostu ciśnienia przekraczającego ustalone wartości. Zawór jest otwierany na skutek wzrostu ciśnienia i ma udrożnić przepływ oleju w silniku, gdy istnieje niebezpieczeństwo niewystarczającego smarowania między współpracującymi ze sobą częściami. Smarowanie silnika olejem nawet brudnym

---

\* Koło Naukowe „Logistics”, Politechnika Wrocławska

jest korzystniejsze dla niego niż całkowity brak czynnika roboczego. Brak smarowania olejem może spowodować uszkodzenie silnika. Dlatego w układach smarowania stosowane są zawory maksymalne. Przeprowadzone badanie miało na celu sprawdzenie jakie zjawiska zachodzą w zaworze przelewowym przy zmianie wysokości otwarcia zaworu.

## 2. NUMERYCZNA MECHANIKA PŁYNÓW

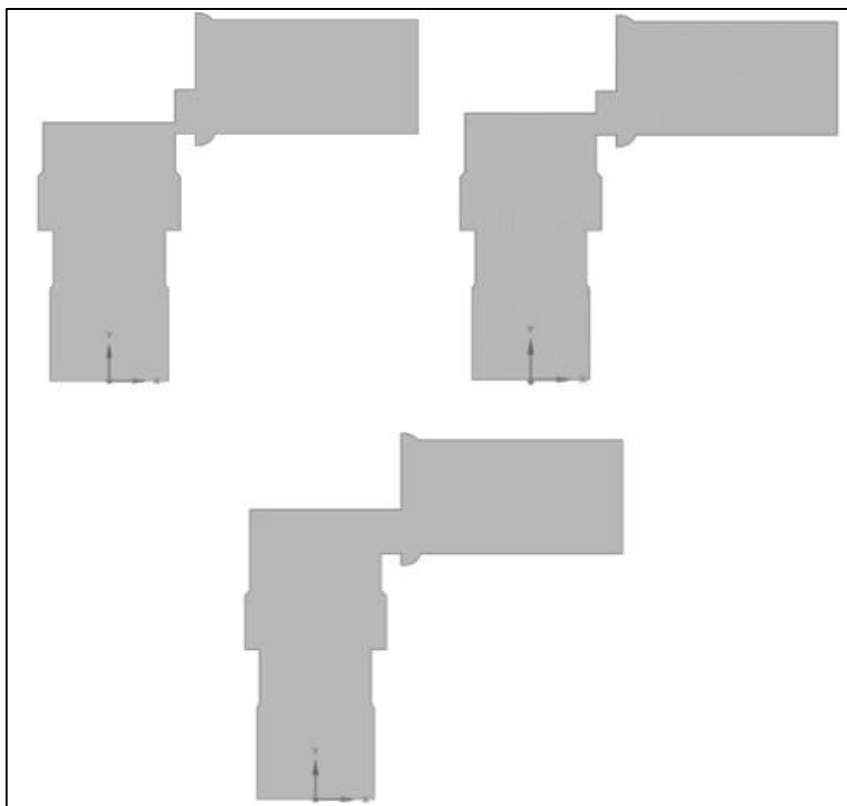
Do zamodelowania przepływu, którego wyniki potrzebne są do obliczenia spadku ciśnienia wykorzystano numeryczną mechanikę płynów. W mechanice płynów w teorii rządzą te same prawa co w mechanice ciała stałego są jednak one bardziej złożone ze względu na właściwości płynów rzeczywistych (cieczy lub gazów). Dlatego bardzo ważnym aspektem przy metodach teoretycznych są metody doświadczalne. Ze względu na to, iż przepływ cieczy, czy gazów towarzyszy nam praktycznie we wszystkich dziedzinach, zaczynając od przepływu krwi przez żyły w naszym organizmie, a kończąc na bardzo skomplikowanych maszynach przemysłowych, stosunkowo szybko rozwija się numeryczna mechanika płynów, z ang. *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Jest to dziedzina komputerowa, która wykorzystuje metody numeryczne do rozwiązywania zagadnień przepływu płynów. Technika CFD cieszy się dużym powodzeniem, ponieważ umożliwia szybsze oraz tańsze przejście od projektu do produkcji. Wcześniej proces ten zaczynał się od zbudowania prototypu następnie badano go doświadczalnie pod kątem sprawdzenia rozkładu temperatur, prędkości ciśnienia płynu, strumieni masy, wykonywano szereg pomiarów. Następnie wprowadzono poprawki oraz modyfikowano model, co wiązało się z większymi kosztami produkcji. Stosując obliczeniową mechanikę płynów skracamy ten proces, ponieważ CFD wykorzystuje prawa ruchu płynu i buduje model wirtualny w postaci równań matematycznych opisujących fizykę przepływu. Następnie wykorzystując odpowiednie oprogramowanie przewiduje zachowanie się przepływów i innych parametrów fizycznych. Pozwala to na łatwe wprowadzanie zmian, sprawdzenie szeregu możliwości konstrukcyjnych bez dodatkowych kosztów produkcji oraz wizualizacji wyników obliczeń. Dlatego badania numeryczne poprzedzają budowę prototypu, a w niektórych przypadkach są jedynym rozwiązaniem przed etapem budowy [1]. Do obliczeń przepływu wykorzystuje się równania matematyczne Naviera-Stokesa w których skład wchodzi równanie ciągłości, równania zachowania składowych pędu, równanie energii i równania stanu.

### 3. MODEL GEOMETRYCZNY

Badania przeprowadzono na zaworze przelewowym polskiej firmy PONAR Wadowice. Z licznych modeli dostępnych w katalogu tej firmy wybrano zawór przelewowy sterowany bezpośrednio typu UDZB. Omawiany zawór potrafi regulować ciśnienie do niskiej wartości przy dużym wydatku.

Na podstawie wymiarów zaworu przelewowego zawartych w katalogu firmy PONAR Wadowice wykonano model geometryczny. Średnica na wlocie oraz wylocie jest równa 23,25 mm, natomiast średnica szczeliny, którą otwiera tłok podczas wzrostu ciśnienia przy maksymalnym otwarciu jest równa 9 mm. Badania zostały przeprowadzone dla trzech położeń tłoczka:

- 25% maksymalnego otwarcia zaworu,
- 50% maksymalnego otwarcia zaworu,
- maksymalne otwarcie zaworu.



Rys. 1. Domena czynnika roboczego w przekroju: 25%, 50%, 100% maksymalnego otwarcia badanego zaworu przelewowego [5]

Fig. 1. Work domain in sections: 25%, 50%, 100% of the maximum opening of the tested overflow valve [5]

#### 4. MODEL DYSKRETNY

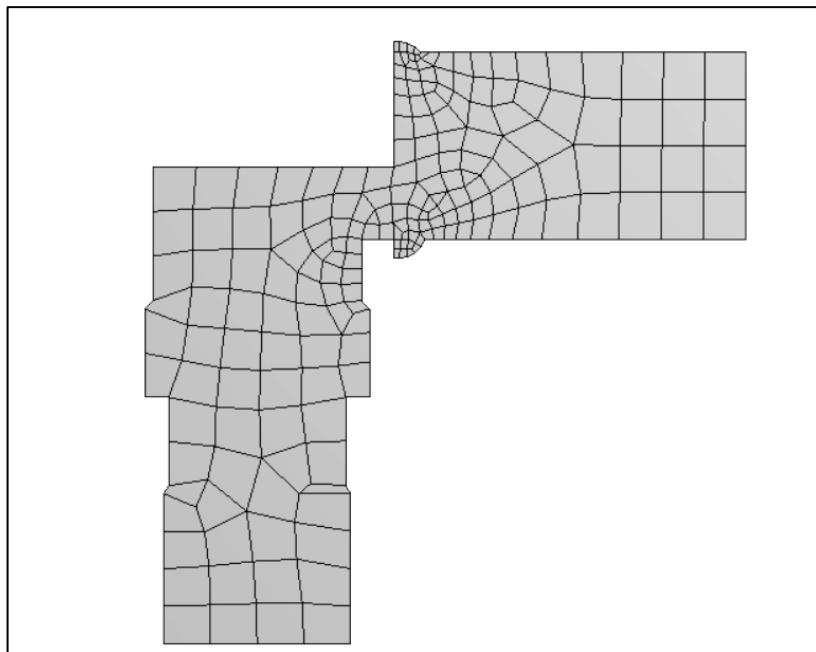
Ze względu na nieliniową naturę równań ruchu płynu rozwiązuje się je w sposób przybliżony, czyli numerycznie. Aby było to możliwe należy zdyskretyzować cząstkowe równania różniczkowe w wyniku czego są one zastępowane układem równań algebraicznych. Dyskretyzację wykonuje się za pomocą siatki numerycznej [1].

Badania przeprowadzono w programie ANSYS Fluent, który umożliwia modelowanie przepływu, turbulencji oraz wymiany ciepła. Do obliczeń program ten wykorzystuje metodę elementów skończonych (MOS). Jest to numeryczna metoda obliczeniowa rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych. Równania różniczkowe są zamieniane na układ równań algebraicznych. Pozwala ona na rozwiązanie problemu brzegowego za pomocą podziału geometrii na zbiór prostych objętości skończonych. Za pomocą siatki, w której węzły obliczeniowe mogą być umieszczone w geometrycznym środku komórki, następuje dyskretyzacja geometrii. To właśnie w węzłach liczone są szukane wartości. Objętości te, to trójwymiarowe wycinki danego obszaru, które otaczają każdy punkt siatki. Rozwiązując dane zagadnienie uwzględniając warunki brzegowe wyznaczane jest przemieszczenie w węzłach. Znając je jesteśmy w stanie obliczyć siły, odkształcenia oraz naprężenia działające w elemencie. Warunki brzegowe zadaje użytkownik i są one kluczowe dla analizy wartości przepływu [2].

Po wprowadzeniu modelu geometrycznego do programu zdefiniowano krawędź wlotu, wylotu oraz pozostałe krawędzie. W następnej kolejności zajęto się dyskretyzacją modelu, czyli wykonaniem siatki za pomocą metody objętości skończonych (MOS). Na rysunku poniżej przedstawiono automatyczną siatkę jaką nadał program ANSYS Fluent na geometrię badanego zaworu przelewowego.

Widoczna na rysunku 2. automatyczna siatka jest mało dokładna ponieważ zawiera jedynie 194 elementy i 238 węzłów. Aby obliczenia były dokładniejsze siatka powinna składać się z większej ilości elementów. Dlatego w celu polepszenia dokładności siatki analizowanego elementu przeprowadzono szereg operacji, które przyczyniły się do jej modyfikacji. Po zastosowanych zmianach ilość elementów skończonych oraz węzłów wyniki zaprezentowano w tabeli 1.

Wprowadzenie modyfikacji w siatce automatycznej spowodowało zwiększenie liczby węzłów oraz elementów średnio o 50 razy. Oznacza to, że wyniki będą dużo bardziej dokładne niż w przypadku pierwszej wersji przy siatce automatycznej.



Rys. 2. Wygenerowana siatka automatyczna badanego zaworu przelewowego [5]

Fig. 2. Generated automatic mesh of the tested overflow valve [5]

Tab. 1. Liczba elementów skończonych i węzłów w siatkach po modyfikacji [5]

Tab. 1. Number of finite elements and nodes in meshes after modification [5]

Otwarcie zaworu	Liczba elementów skończonych	Liczba węzłów
25%	10171	10458
50%	10355	10643
100%	10822	11113

## 5. MODEL PŁYNU ORAZ WARUNKI BRZEGOWE

Do obliczeń wybrano model turbulencji  $k-\varepsilon$  ze względu na najszersze i najbardziej uniwersalne zastosowanie w rozwiązaniach przemysłowych. Jest to dwurównaniowy model dla przepływów turbulentnych. Zawiera podmodele do uwzględniania ściśliwości, spalania, itp. Dobrze się sprawdza dla złożonych przepływów z szyb-

kimi zmianami parametrów cieczy, lokalnych zaburzeń, czy umiarkowanych turbulencji. Żeby określić rodzaj przepływu obliczono liczbę Reynoldsa. W badanej szczelinie występuje przepływ turbulentny.

Cieczą roboczą przepływającą przez zawór przelewowy jest olej HL48 ze względu na działanie średniego obciążenia układu. Oleje HL są odporne na starzenie oraz zapewniają ochronę układu hydraulicznego przed korozją.

Na wlocie warunkiem brzegowym jest prędkość. Natomiast na wylocie jest ciśnienie równe zero ( $P = 0$  MPa), swobodny wypływ czynnika roboczego. Obliczenia prowadzone w programie odbyły się w stanie ustalonym niezależnie od czasu. W celu uzyskania zbieżności rozwiązań założono 300 iteracji.

Tab. 2. Wyniki obliczeń prędkości na wlocie do zaworu przelewowego [5]

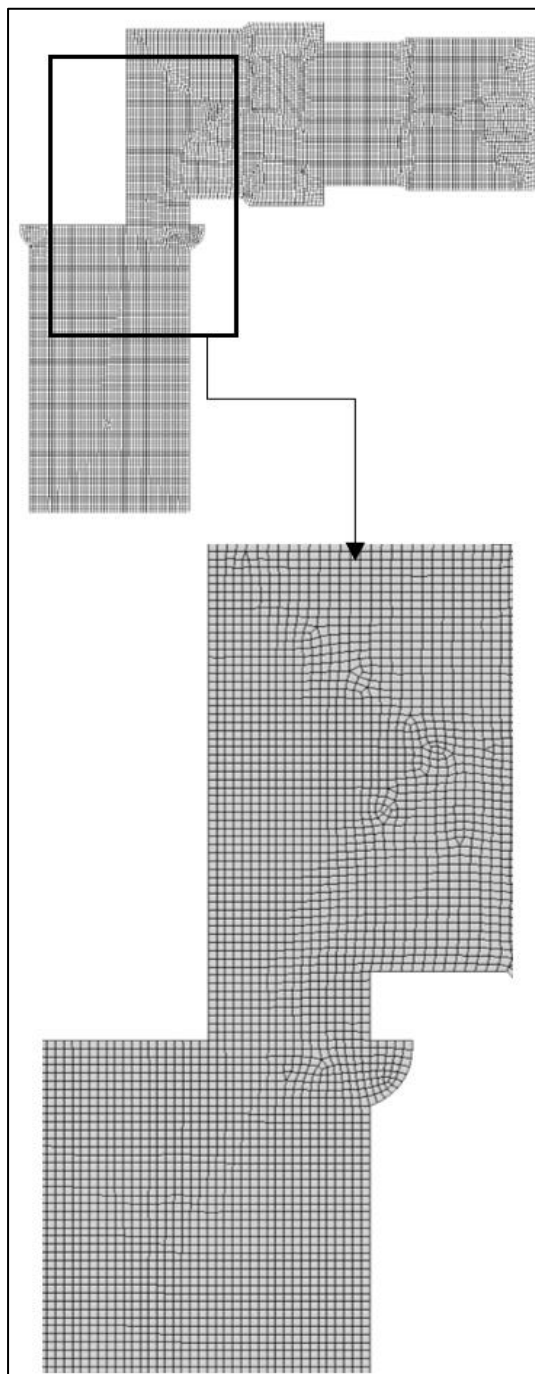
Tab. 2. Results of speed calculations at the inlet of the bypass valve [5]

<b>Średnica wlotowa zaworu [mm]</b>	23,25	23,25	23,25
<b>Maksymalne natężenie przepływu <math>\left[\frac{\text{dm}^3}{\text{min}}\right]</math></b>	75	150	300
<b>Prędkość liniowa <math>\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]</math></b>	2,9	5,9	11,79

## 6. ANALIZA SPADKU CIŚNIENIA

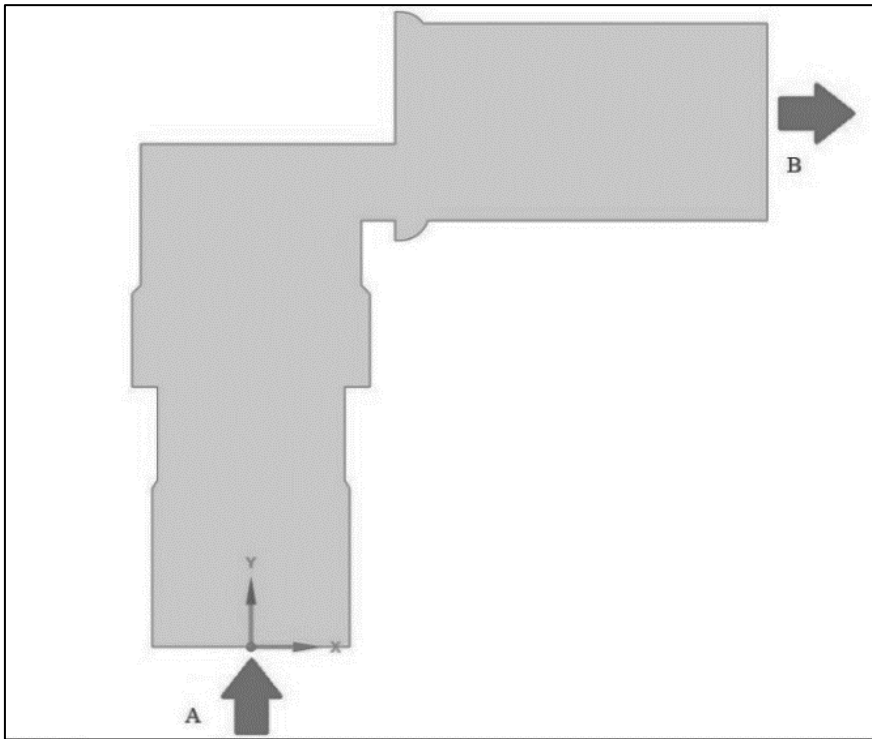
Podczas przepływu cieczy w układach hydraulicznych oprócz strat objęściowych i liniowych występują także straty miejscowe. Najczęściej są one spowodowane nagłą zmianą przekroju przewodu, zmianą kierunku ułożenia przewodów, np. zastosowanie kolanek lub łuków oraz przez stosowanie elementów układu, które sterują kierunkiem i natężeniem przepływu oraz ciśnieniem, są to zawory i rozdzielacze. Spadek ciśnienia na przeszkodzie miejscowej zależy od parametrów określających przepływ cieczy, od stopnia wzburzenia na wejściu do tej przeszkody, od rodzaju i geometrii [3].

W zaworze przelewowym występuje nagłe zmniejszenie przekroju. W takim przypadku bardzo prawdopodobne jest wystąpienie zjawiska kawitacji. Przy nagłym spadku ciśnienia w zaworze następuje nagły wzrost prędkości w miejscu przewężenia przekroju. Spadek ciśnienia powoduje miejscowe parowanie cieczy, a tym samym powstawanie pęcherzyków parowych w płynącym czynniku roboczym. Dzieje się tak, gdy spadek ciśnienia jest poniżej ciśnienia parowania.



Rys. 3. Siatka badanego zaworu przelewowego otwartego na 100% maksymalnego otwarcia [5]

Fig. 3. Mesh of the tested overflow valve open at 100% of the maximum opening [5]



Rys. 4. Schemat przepływu cieczy roboczej przez zawór przelewowy, A – wlot, B-wylot [5]

Fig. 4. Diagram of working liquid flow through the overflow valve, A - inlet, B-outlet [5]

Aby powstała kawitacja ciecz musi zostać poddana działaniu naprężeń ścinających, które wynikają z wewnętrznego tarcia lepkiego oraz określonego podciśnieniu. Jest ono niekorzystne dla układu hydraulicznego ze względu na możliwość jego zapowietrzenia, zużycie erozyjne elementów hydraulicznych wywołane mikrouderzeniami ciśnienia, niszczenie uszczelnień oraz obniżenie sprawności pomp [4]. Kawitacji towarzyszy także duży wzrost poziomu hałasu. Proces kawitacji jest bardzo groźny w układach hydraulicznych.

W tabeli 3. przedstawiono jak wygląda spadek ciśnienia w zaworze dla poszczególnych prędkości na wlocie oraz wysokości wzniosu tłoczka.

Na rysunkach 5-7. przedstawiono porównanie wyników badań rozkładu ciśnień oraz wektorów prędkości podczas przepływu oleju przez zawór maksymalny. Ma to na celu zobrazować i potwierdzić iż podczas nagłego spadku ciśnienia gwałtownie rośnie prędkość cieczy roboczej. W miejscu występowania wysokiego ciśnienia jest mała prędkość cieczy roboczej, natomiast tam gdzie ciśnienie maleje rosną straty. Analizując wyniki badań można zauważyć, że najwyższe ciśnienie panujące w zaworze przelewowym umiejscowionym w układzie smarowania pojazdów spalinywych występuje w obszarze napierającym na tłoczek.



Tab. 3. Spadek ciśnienia na przeszkodzie miejscowej dla trzech położen tloczka [5]  
 Tab. 3. Pressure drop on a local obstacle for three positions of the spool [5]

$v_0 \left[\frac{m}{s}\right]$	2,9	5,9	11,29
$d_2$ [mm]	2,25		
$v \left[\frac{m}{s}\right]$	32	66,24	134,7
$\Delta p$ [bar]	2,05	8,78	36,29
$d_2$ [mm]	4,5		
$v \left[\frac{m}{s}\right]$	18,72	38	76,49
$\Delta p$ [bar]	0,7	2,98	11,7
$d_2$ [mm]	9		
$v \left[\frac{m}{s}\right]$	10,41	21,65	43,22
$\Delta p$ [bar]	0,17	0,75	2,99

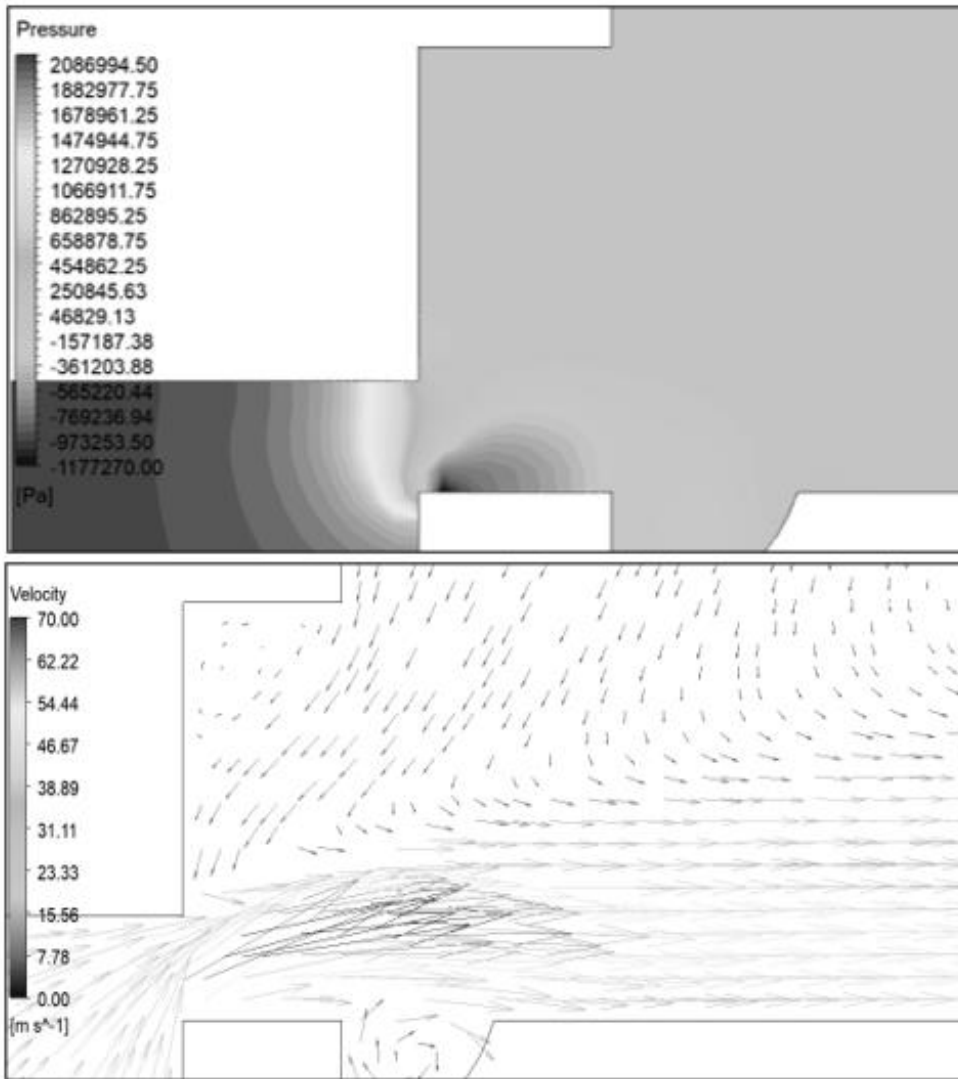
W miejscu przepływu przez szczelinę dochodzi do nagłego spadku ciśnienia, aż do powstania podciśnienia przy dolnej krawędzi zwężki. W pozostałej części zaworu, gdy średnica się zwiększa, aż do wylotu ciśnienie jest stałe. Ciśnienie w całym zaworze zmienia się w zależności od położenia tloczka oraz od zadanej prędkości na wlocie. Im mniejsze otwarcie zaworu tym ciśnienie panujące w całym zaworze maksymalnym jest wyższe i wraz z podnoszeniem się elementu otwierającego ciśnienie w tym elemencie proporcjonalnie maleje.

Im większe jest otwarcie zaworu tym wartość podciśnienia jest większa i zajmuje większy obszar. Większe podciśnienie oznacza większy spadek ciśnienia w miejscu przewężenia. Najniższe ciśnienie w zaworze powinno występować w miejscu, gdzie jest największa prędkość. W tym przypadku w miejscu zwężenia następuje spadek ciśnienia, natomiast jego najniższa wartość jest tuż za nim. Dzieje się tak, ponieważ podczas przepływu cieczy przez zawór następuje w dwóch miejscach oderwanie się strugi co powoduje powstanie wirów.

W tym przypadku za wiry odpowiedzialna jest geometria elementu. Występowanie wiru w tym miejscu jest niekorzystne dla zaworu ponieważ może prowadzić do powstania zjawiska kavitacji.

Analizując wykresy wektorów prędkości panujących w zaworze przelewowym podczas przepływu przez niego czynnika roboczego, można zauważyć, że do wzrostu prędkości dochodzi w momencie, gdy ciecz zbliża się do miejsca otwarcia zaworu.

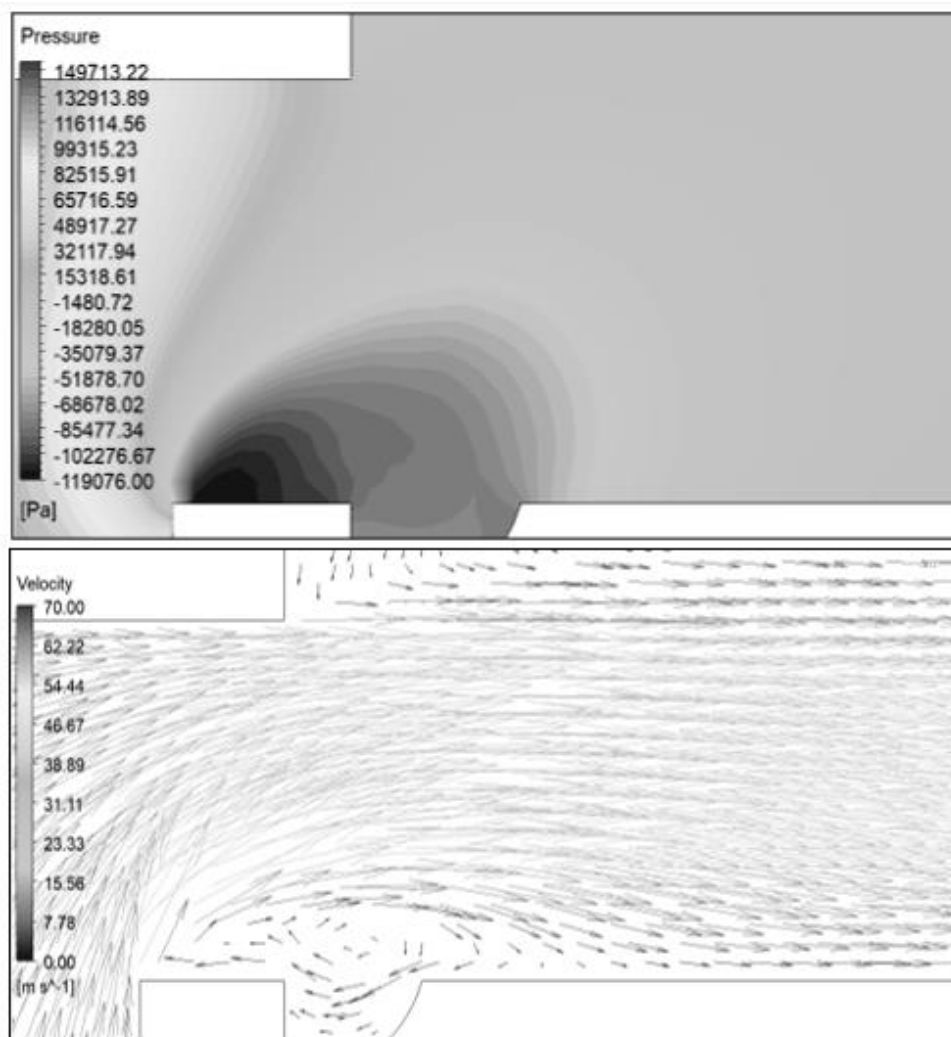
Prędkość w szczelinie jest kilkukrotnie większa niż prędkość na wlocie do zaworu. Jednak maksymalny spadek ciśnienia występuje w miejscu oderwania strugi. Gdy średnica ponownie się zwiększa prędkości maleją. Znajduje to uzasadnienie w prawie Bernoulliego.



Rys. 5. Na górze: rozkład ciśnienia, na dole: rozkład wektorów prędkości w zaworze przelewowym dla prędkości zadanej na wlocie  $5,9 \text{ m/s}$ : 25% maksymalnego otwarcia zaworu [5]

Fig. 5. Top: pressure distribution, bottom: velocity vectors distribution in the bypass valve for the inlet speed of  $5.9 \text{ m/s}$ : 25% of the maximum valve opening [5]

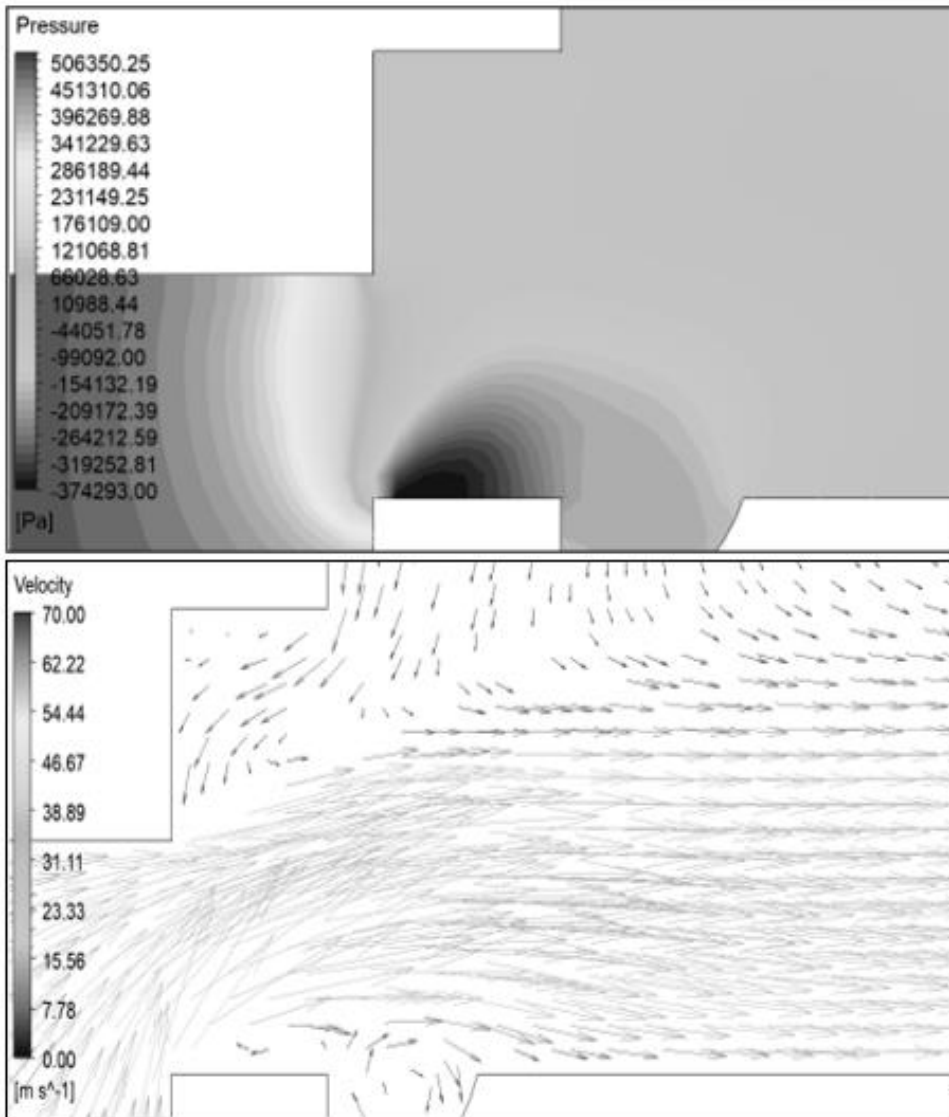
Porównując wykresy wektorowe prędkości przepływu w zaworze przelewowym widać, że prędkości w miejscu otwarcia szczeliny zaworu różnią się od siebie w zależności od wzniosu tłoczka. Największe prędkości w tym miejscu występują przy zaworze otwartym na wysokość 25% maksymalnej wysokości natomiast najmniejsze przy największym otwarciu.



Rys. 6. Na górze: rozkład ciśnienia, na dole: rozkład wektorów prędkości w zaworze przelewowym dla prędkości zadanej na wlocie  $5,9 \text{ m/s}$ : 50% maksymalnego otwarcia zaworu [5]

Fig. 6. Top: pressure distribution, bottom: velocity vectors distribution in the bypass valve for the set inlet speed of  $5.9 \text{ m/s}$ : 50% of the maximum valve opening [5]

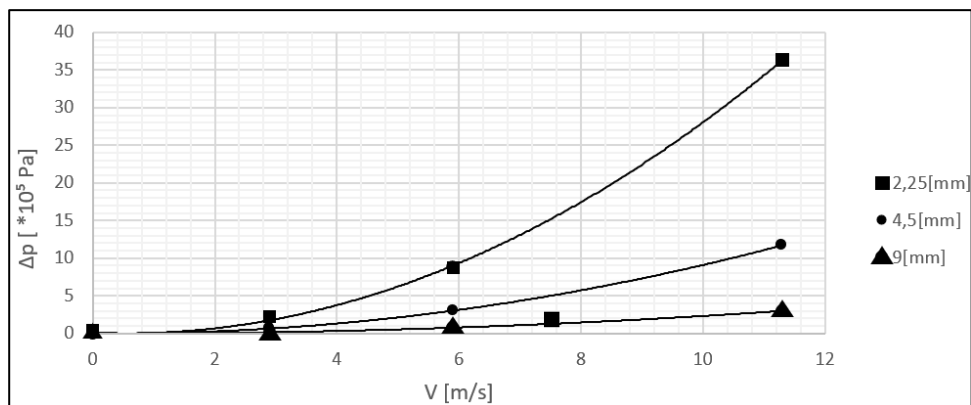
Prędkość w szczelinie maleje proporcjonalnie do wzniosu elementu oporowego. Im szczelina jest mniejsza tym czynnik roboczy szybciej płynie i występuje większe prawdopodobieństwo powstania kawitacji. Nie jest to korzystne dla tego elementu, ponieważ może dojść do rozszczelnienia lub zniszczenia go co spowoduje konieczność szybszej wymiany zaworu. Im większy jest wznios tłoczka tym większy jest gradient prędkości.



Rys. 7. Na górze: rozkład ciśnienia, na dole: rozkład wektorów prędkości w zaworze przelewowym dla prędkości zadanej na wlocie  $5,9 \text{ m/s}$ : 100% maksymalnego otwarcia zaworu [5]

Fig 7. Top: pressure distribution, bottom: velocity vectors distribution in the bypass valve for the set inlet speed of  $5.9 \text{ m/s}$ : 100% of the maximum valve opening [5]

Przy otwarciu na 25% wysokości największa prędkość zmniejsza się zaraz po wyjściu ze zwężki, natomiast podczas całkowitego otwarcia zaworu największe prędkości utrzymują się praktycznie, aż do wylotu. Punkt największej prędkości nie występuje w miejscu największego zwężenia tylko za nim, w punkcie nałożenia się efektów oderwania strugi.



Rys. 8. Zależność spadku ciśnienia od prędkości na wlocie do zaworu

Fig. 8. The dependence of the pressure drop on the velocity at the inlet to the valve

Spadek ciśnienia w zaworze niesie za sobą straty miejscowe. Na rysunku 8. można zauważyć zależność spadku ciśnienia od wielkości otworu. Im większa jest średnica otworu tym spadek ciśnienia jest mniejszy. Im mniejsza jest szczelina tym płyn szybciej płynie i bardziej prawdopodobne jest wystąpienie kawitacji.

## 7. PODSUMOWANIE

Zbadanie przepływu oleju przez zawór maksymalny miało na celu sprawdzenie do jakich zjawisk dochodzi podczas przepływu. Program ANSYS Fluent wykorzystujący do obliczeń metodę CFD zdecydowanie ułatwia projektowanie oraz analizę przepływu płynu przez element. Pozwala on na wykrycie błędów konstrukcyjnych na wczesnym etapie projektowania, co powoduje zmniejszenie kosztów. Wykonywanie analizy numerycznej jest dokładniejsze od przybliżonych obliczeń analitycznych. Analizując wyniki przepływu oleju przez zawór przelewowy potwierdziło zachodzenie prawa Bernoulliego. W miejscach występowania wysokiego ciśnienia jest mała prędkość, a w miejscach niskiego ciśnienia występuje duża prędkość przepływu. Aby przepływ był możliwy przez zawór przelewowy musi występować różnica ciśnień. Jednak spadek ciśnienia w elemencie powoduje powstawanie strat miejscowych, co nie jest korzystne dla układu. Po wykonanych obliczeniach zaobserwowano, że największe straty miejscowe spowodowane spadkiem ciśnienia występują przy najmniejszym otwarciu zaworu (25% wysokości otwarcia). Im szczelina jest większa tym spadek ciśnienia jest mniejszy. Najkorzystniej jest w sytuacji, gdy zawór jest otwarty maksymalnie, natomiast jest to ciężkie do uzyskania ponieważ, aby tak otworzyć zawór w układzie musi nastąpić nagłe duże przeciążenie – wzrost ciśnienia w układzie. Wtedy wysokie ciśnienie spowoduje maksymalne

otwarcie zaworu. Nie jest korzystne otwarcie zaworu na niewielką wysokość ponieważ im mniejsze otwarcie tym większa jest prędkość oleju, a co za tym idzie większe podciśnienie. Powstaje wtedy kawitacja, która nie jest pożądanym zjawiskiem ze względu na występowanie hałasu oraz niszczenie elementu poprzez mikro uderzenia. Będzie to powodowało nieszczelność i szybsze zniszczenie zaworu, czego konsekwencją jest konieczność częstszej wymiany elementu.

## LITERATURA

- [1] KUDELA H., Laboratorium numerycznej mechaniki płynów
- [2] JANOTA M., WŁADZIELCZYK K., Wykorzystanie metody CFD do obliczania natężenia przepływu medium w zaworach przelewowych sekcji obudowy zmechanizowanej
- [3] STRYCZEK S., Napęd hydrostatyczny, układy, Tom II,(1992) Warszawa, WNT
- [4] KUDŹMA Z., OSIŃSKI P., RUTAŃSKI J., STOSIAK M., Hydrostatyczne układy napędowe , T: Eksperymentalne wyznaczanie charakteru oporów w przewodach hydraulicznych – opory liniowe
- [5] Opracowanie własne

## **NUMERICAL ANALYSIS OF THE PRESSURE DROP IN THE MAXIMUM VALVE OF THE LUBRICATION SYSTEM OF COMBUSTION VEHICLES**

**Key words:** *maximum valve, pressure drop, pressure loss, numerical analysis of fluid mechanisms*

The paper below presents an analysis of the oil flow through the PONAR Wadowice UDZB overflow valve used in lubrication systems. Its aim is to present the phenomena occurring when changing the size of the gap in the valve. The paper contains information on the pressure drop – why does it happen and what its effects may be.