

EVALUATION OF CONTINUITY OF ENVIRONMENT BASED ON KNUDSEN NUMBER CALCULATIONS

Jakub Jenáček

Mathias Lerch Gymnasium Brno

E-mail: JakubJenacek@seznam.cz

Supervised by: Pavla Šabacká

E-mail: hlavata.pavla@gmail.com

Abstract: This article deals with the evaluation of the Knudsen number in the research area of the Experimental Chamber. The number indicates the continuity of the environment. In our case, the Knudsen number was evaluated on the basis of results obtained by mathematical - physics analysis in the Ansys Fluent system. The results presented in this article will further serve as a basis for experimental measurement of the problem.

Keywords: Knudsen number, Ansys Fluent, Differentially pumped chamber

1 INTRODUCTION

V současné době je na Ústavu elektrotechnologie FEKT VUT Brno ve spolupráci s UPT AVČR uvedena do výroby experimentální komora simulující stav proudění v oblasti kritického proudění v clonce diferenciálního čerpání Environmentálního elektronového mikroskopu viz fig. 1. Vzhledem k tomu, že jde o proudění plynu v dané oblasti nadzvukového proudění v nízkých tlacích, bylo nutné stanovit hodnotu Knudsenova čísla určujícího charakter proudění.

V tomto článku je popsán můj podíl na daném výzkumu při stanovení daného charakteru.

2 REŽIMY PROUDĚNÍ

V běžném atmosférickém tlaku se plyn chová jako spojitě prostředí, ve kterém mezi molekulami působí různé síly jako jsou gravitace, tlak, tření o sousední části tekutiny a vznik turbulence. Pro řešení spojitěho prostředí se využívají Navier-Stokesovy rovnice, neboť tyto se odvozují od zmíněných sil, které působí na jednotlivé části tekutiny. Stav tekutiny je popsán její rychlostí a tlaky ve všech bodech, ve kterých se tekutina nachází.

Při poklesu tlaku, a tedy hustoty plynu se vzdálenost mezi jednotlivými molekulami zvětšuje a dané síly přestávají působit a stav plynu je dán pohybem volných molekul. Pro tyto stavy se pro výpočty využívají statistické metody, například Monte Carlo [1]. Tato metoda neklade požadavek na spojitě prostředí. Může tedy vracet špatné výsledky, neboť je vhodná pouze pro výpočet pohybu osamocených molekul, tedy tam, kde již neplatí Navier-Stokesovy rovnice, kde prostředí již není kontinuální (spojité). Jedná se o prostředí velmi nízkých tlaků [2].

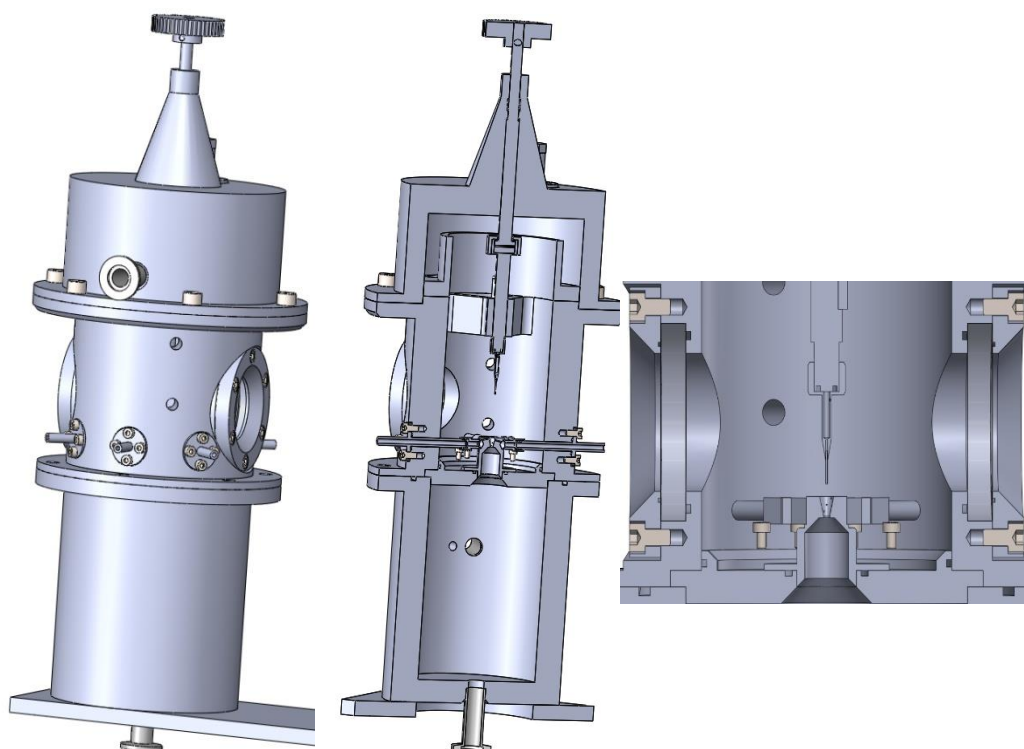


Figure 1: Připravovaná experimentální komora

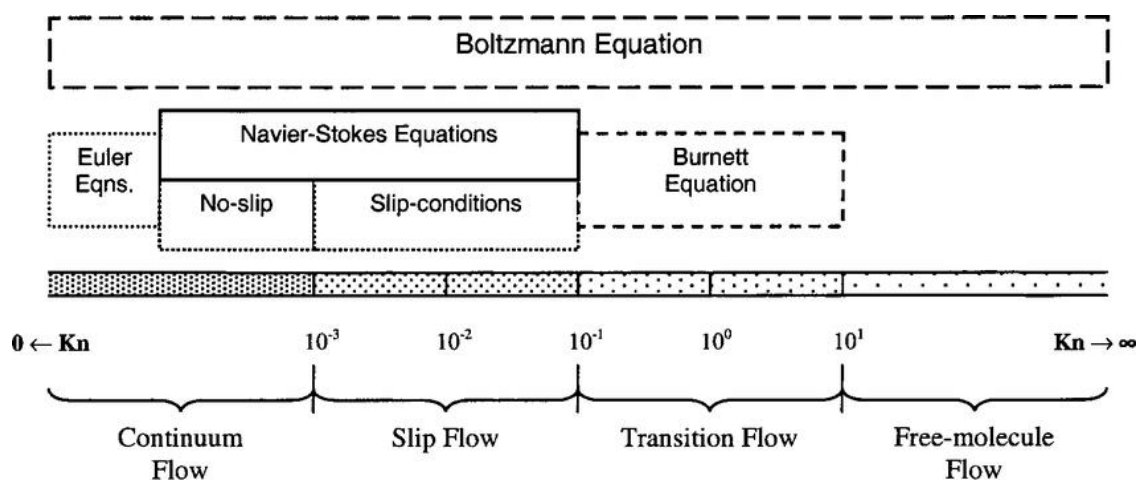


Figure 2: Režimy proudění podle Knudsena [3]

2.1 KNUDSENOVO ČÍSLO [4]

Zda se ještě v našem případě jedná o spojité prostředí, určuje Knudsenovo číslo. V našem případě výzkumu diferenciálního čerpání se v některých místech blížíme hraniční hodnotě, ale stále se pohybujeme v oblasti kontinua. Hodnoty Knudsenova čísla jsme stanovili na základě následujících rovnic.

Podobnostní Knudsenovo číslo:

$$Kn = \frac{\bar{l}}{d} \quad [1]$$

$$\bar{l} = \frac{kT}{\pi\sqrt{2}d_m} \quad [2]$$

Přibližný vztah pro vzduch:

$$\bar{l} = \frac{7 \cdot 10^{-3} [m]}{p [Pa]} \quad [3]$$

Kde:

d – charakteristický rozměr soustavy

l – střední volná dráha

d_m – průměr molekuly

T – absolutní teplota

k – Boltmannova konstanta

Potom platí zjednodušené rozdělení prostředí dle výsledků Knudsenova čísla:

$Kn < 0,1$... Kontinuum (viskózní) proudění

$0,1 < Kn < 0,5$... Přechodové (Knudsenovo) proudění

$Kn > 0,5$... Molekulární proudění

Jak už bylo řečeno, oblasti se dle Knudsenova čísla dělí na spojitě a na pohyb volných molekul. Obě tyto oblasti byly vědci již dostatečně zmapovány. V našem případě se však jedná o oblast na úplném okraji spojitěho prostředí, kde se již může projevovat vliv nízkých setrvačných sil. Tato oblast ještě není ve světě experimentálně zmapována. Z tohoto důvodu se vyrábí již zmiňovaná experimentální komora, která má ukázat, zda jsou naše předpoklady spojitěho prostředí v oblasti nízkých tlaků správné.

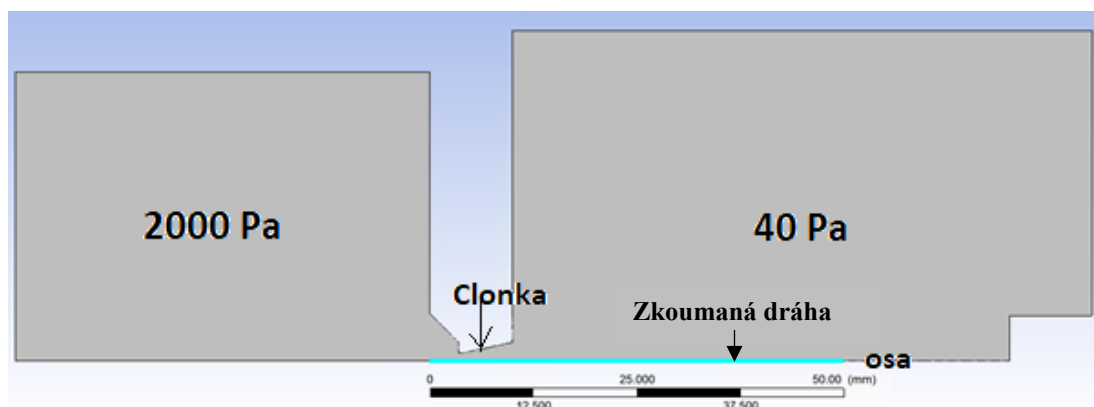


Figure 3: 2D osově symetrický model experimentální komory pro výpočet Knudsenova čísla

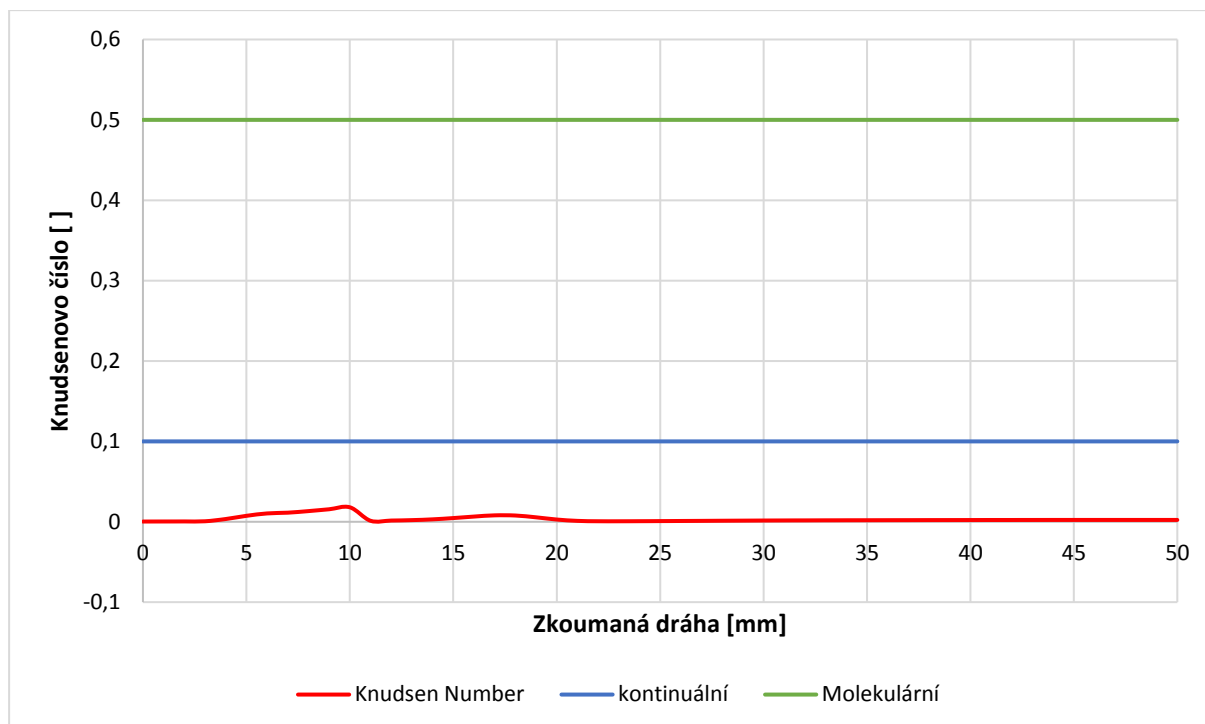


Figure 4: Grafické rozložení Knudsenova čísla

3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Veškeré výpočty, které byly v mé práci uvedeny, byly realizovány v systému Ansys Fluent. Výsledky Knudsenova čísla jsou dále uvedeny v grafickém znázornění na obr. 4 (Fig. 4). Jak už bylo uvedeno, dle hodnot Knudsenova čísla, se stále pohybujeme v kontinuálním prostředí (spojitém). To ukazuje i grafická závislost, kde je možné vidět že hodnoty Knudsenova čísla (červená) se stále pohybují pod hranicí hodnoty 0,1.

REFERENCES

- [1] Danilatos, GD.: Velocity and ejector-jet assisted differential pumping: Novel design stages for environmental SEM. Micron, 2012, vol. 43, no. 5, p. 600-611.
- [2] Maxa, J., Bílek, M., Hlavatá, P., Vyroubal, P., Leplová, K.: Comparisons Using Methods of Continuum Mechanics and Monte Carlo at Differentially Pumped Chamber. Advances in Military Technology, 2016, vol. 11, no. 2, p. 143-150. ISSN: 1802-2308.
- [3] Roy, S., Raju, R., Chuag, H., Cruden, B., Meyyappan, M.: Modeling gas flow through microchannels and nanopores. Journal of Applied Physics, 2003, Vol. 93, No. 8, p. 4871.
- [4] Šabacká, P.: Analýza nadzvukového proudění v experimentální komoře při vložení tlakových a teplotních sond. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124527>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie.