

## Числено (CFD) моделиране на загубите на налягане в пневмоциклон и валидиране

Иван Дуков      Диана Танева

### Резюме

*В предлаганата работа се разглежда приложението на изчислителната механика на флуидите и компютърната програма ANSYS Fluent за моделиране и определяне на загубите на налягане в пневмоциклон за течения на чист газ и газ-твърда фаза. Получените резултати са сравнени с експериментално определените. Загубите на налягане нарастват с увеличаване на скоростта на газовата фаза и с намаляване на масовия дебит на твърдата фаза.*

**Ключови думи:** пневмоциклон, CFD; загуби на налягане, валидиране

## CFD simulation of the pressure drop in gas cyclone and validation

Ivan Dukov      Diana Taneva

### Abstract

*This study presents application of CFD tools and commercial code ANSYS Fluent for modeling of the pressure drop for gas and gas-solid flow in cyclone. Results of the simulation are compared with data from experimental model studies. The pressure drop increases with the increasing velocity of the gas phase and with decreasing of the solid mass flow rate.*

**Keywords:** gas cyclone, CFD, pressure drop, validation

### ВЪВЕДЕНИЕ

Пневмоциклонът е създаден през 80-те години на 19-ти век. Основните предимства, поради които се използва и до днес, са сравнително опростената конструкция, ниските експлоатационни разходи и сигурността му по време на работа. Пневмоциклоните широко се използват в редица производствени процеси за отделяне на твърдата фаза от газообразната, като най-често те намират приложение в химическата, хранителната, фармацевтичната промишленост, строителството, както и в селското стопанство.

Съществуват различни видове пневмоциклони с радиално или тангенциално подаване на газовата и твърдата фаза, като в предлаганата работа се разглежда втория вид. За отделянето на частиците от газа се използва центробежната сила и гравитацията. Тангенциално разположения вход на циклона придава на газовата и твърдата фаза въртливо движение, като под действието на центробежната сила частиците се приближават към стените на циклона и губейки кинетичната си енергия падат към дъното му. Въздушния поток, под действието на високото налягане на продължаващия да влиза в циклона въздух, се преобразува във възходяща спирала, която напуска циклона през вертикалната тръба в горната му част.

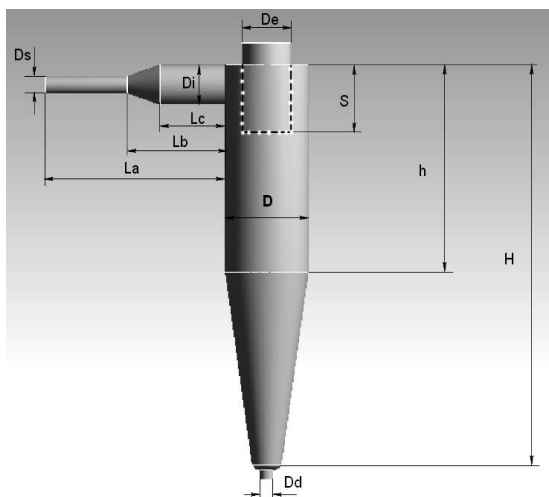
Въпреки простата си конструкция и начин на действие, динамиката на флуидните течения в пневмоциклоните е сложна, като именно поради тази причина определянето на основните им работни характеристики е доста затруднено. От инженерна гледна точка най-съществено значение имат загубите на налягане. В достъпните литературни източници загубите на налягане зависят основно от геометрията на циклона и масовия разход на газовата и твърдата фаза. Обикновено циклоните се разполагат в края на системата и

пречистеният въздух се отвежда към атмосфера, затова най-често загубите в пневмоциклона се приемат равни на налягането, което трябва да се поддържа на входа за да се осъществи определена производителност. През последните години изчислителната механика на флуидите (CFD) намира голямо приложение при изследването на теченията в пневмоциклоните, като чрез популярните софтуерни продукти за сравнително кратко време могат да бъдат определени загубите. Основен проблем е правилния избор на турбулентен модел, който да опише силно въртеливото течение, което се образува в пневмоциклона. В [1] и [3] се разглеждат детайлно стандартния и Re-Normalization (RNG)  $k-\varepsilon$  модел. В настоящата работа се използва RNG  $k-\varepsilon$ , поради постигнатото добро съвпадение по отношение на експерименталните и числените резултати. Множество автори провеждат подробни изследвания чрез компютърни симулации върху влиянието на геометричните параметри на циклона върху загубите на налягане, но значително по-малко са изследванията относно влиянието на масовия разход на двете фази и най-вече валидирането на получените резултати. Една от вероятните причини за това е липсата на експериментална уредба и подходящо техническо оборудване за осъществяването на експериментите, които да бъдат еквивалентни на числените симулации. Именно поради тази причина основната цел на предлаганата работа е моделирането на пневмоциклон от съществуваща експериментална уредба и получаването на резултати относно загубите на налягане чрез средствата на ANSYS Fluent [4], които да бъдат валидирани чрез реалния модел в лабораторни условия.

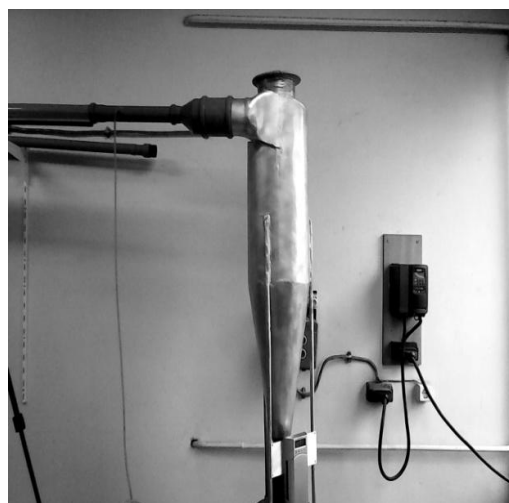
Преглед и критически анализ на някои от известните работи в тази област са дадени в [1] и [2].

#### ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ И ОПИТНА УРЕДБА

Разглежда се пневмоциклон с тангенциален вход, като основните геометрични размери на пневмоциклона са показани на фиг. 1 и са дадени в mm в табл.1. Фигура 2 дава обща представа за практическата реализацията на пневмоциклона.



Фиг. 1. Основни геометрични параметри



Фиг. 2. Общ изглед на пневмоциклона

Основни геометрични размери

Табл. 1

| $D_s$ | $D_i$ | $D_e$ | $D$ | $D_d$ | $H$  | $h$ | $S$ | $L_a$ | $L_b$ | $L_c$ |
|-------|-------|-------|-----|-------|------|-----|-----|-------|-------|-------|
| 46.5  | 110   | 150   | 255 | 40    | 1100 | 570 | 160 | 550   | 300   | 200   |

Лабораторната система за пневмотранспорт, от която е моделирания циклон, е реализирана по схема на нагнетяване. Твърдата фаза е полипропилен със среден диаметър на частицата  $d_p = 3.6 \text{ mm}$ , плътност  $\rho_p = 876 \text{ kg/m}^3$  и степен на сферичност  $\Gamma = 0.84$ , дефинирана по:

$$\Gamma = \frac{S_{сф}}{S_{\delta}}, \quad (1)$$

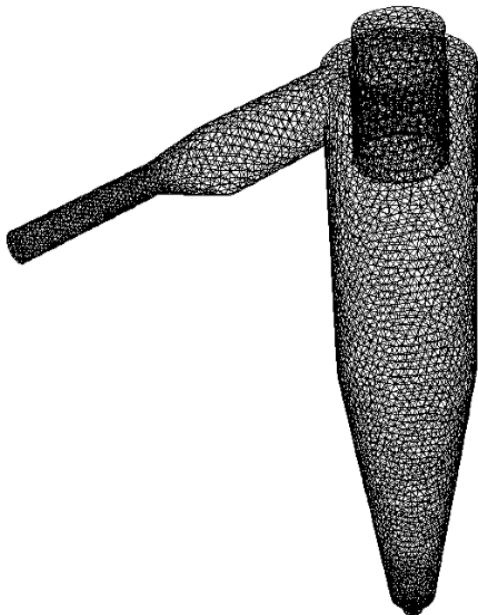
където  $S_{сф}$  е повърхностната площ на сфера със същия обем, а  $S_{\delta}$  е действителната повърхностна площ на частицата. Параметрите на твърдата фаза са определени експериментално чрез пикнометър, прецизна лабораторна везна, фотографска техника и софтуер за обработка на изображения.

Масовият дебит на твърдата фаза на изхода от циклона се определят посредством тегловна измервателната система описана в [5]. Там е дадено подробно описание на опитната уредба, работата с нея и измерването на отделните величини. Отношението между масовите разходи на частиците  $m_p$  и на газа  $m_q$  определя коефициента на натоварване  $\mu$  на пневмотранспортната система:

$$\mu = \frac{m_p}{m_q}. \quad (2)$$

В условията на експерименталните изследвания коефициентът на натоварване се изменя в границите  $\mu = 0.72 \div 2.66$ . Това са стойности характерни за пневмотранспорт в суспендирано състояние.

### ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ (CFD) И ВАЛИДИРАНЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ



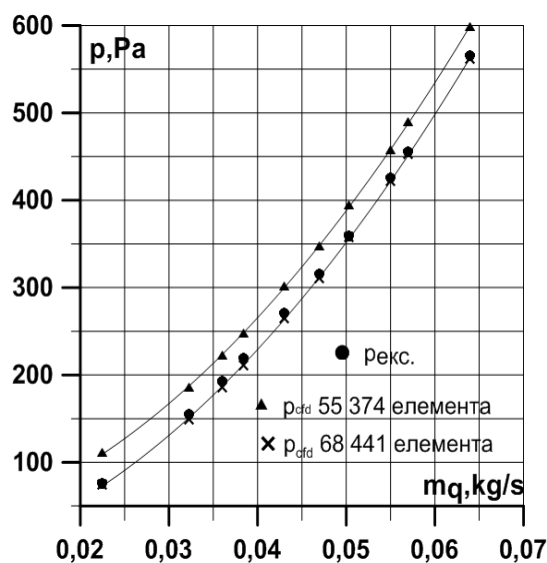
Фиг. 3. Изчислителна мрежа

Изчислителната мрежа е неструктурирана и съставена от 68 441 елемента. На фиг. 3 е показана използваната изчислителна мрежа. Гъстотата на мрежата е определена след няколко последователни симулации, като е направено сравнение между числените и експерименталните резултати за мрежи с различен брой елементи. Първоначално генерираната мрежа се състои от 55 374 елемента, като постепенно започва да се увеличава техния брой. При 68 441 елемента се постига изпълняването на основното условие за правилното провеждане на всяко CFD моделиране, а именно да се постигне независимост на решението от броя на елементите на изчислителната мрежа.

Извършват се числени симулации съответно при протичане само на газ и при течение газ-твърда фаза през пневмоциклона. И при двата случая се използва RNG  $k-\epsilon$  турбулентен модел, при който ефектът от завъртането на течението е включен при изчисляването на турбулентния вискозитет, като е прието течение в условията на хидравлически гладки стени. Граничните условия при численото моделиране на пневмоциклона са: на входа – зададен масов дебит на газа; на двата изхода на циклона – произволно налягане. Работният флуид се приема несвиваем, въздух с плътност съответстваща на тази в условията на отделните измервания. При числените симулации с газ-твърда фаза за моделирането на частиците се използва DPM модела основан на Ойлер-Лагранжевия подход. При него флуидната фаза се третира като континуум, чрез решаване на Навие-Стоксовите уравнения с подходящ модел

на турбулентност. Дискретната фаза се моделира, като се проследява движението (траекториите) на достатъчно голям брой частици, през вече изчисленото скоростно поле на непрекъснатата фаза, в Лагранжева координатна система. Двете фази си обменят количество на движение - т. е. осъществява се двупосочно влияние (two-way coupling). На входа на циклона се задава съответния масов дебит на твърдата фаза, който е определен експериментално при зададен дебит на газа. За дискретната фаза се задават освен степента на сферичност още и тангенциалния и нормалния коефициент на възстановяване на вектора на скоростта, съгласно [6]. Тези коефициенти са функция на ъгъла на падане. Важно изискване за правилното моделиране на твърдата фаза е адекватното задаване на скоростта ѝ във входящото сечение. В повечето налични изследвания провеждани в тази област, скоростта на частиците се приема за еквивалентна на газовата фаза дори и при относително едри частици, като в действителност тя е по-ниска от тази на носещата фаза. Именно поради тази причина, при моделирането на твърдата фаза се добавя допълнителен изчислителен участък за ускорение на частиците с дължина 2 m, като в началото на този участък те се въвеждат със скорост 0 m/s и до мястото, където е извършено експерименталното измерване на налягането (входа на пневмоциклона), те имат вече установена средна стойност на скоростта, което отговаря на реалните условия.

Сходимостта на решението при изчисляването на пневмоциклона с газ и газ-частици се получава за около 5000 итерации. Използвания компютър е с четириядрен процесор на 3.3 GHz и паралелна организация на изчисленията, което отнема приблизително 40 min за течение на газ и 60 min за газ-частици.

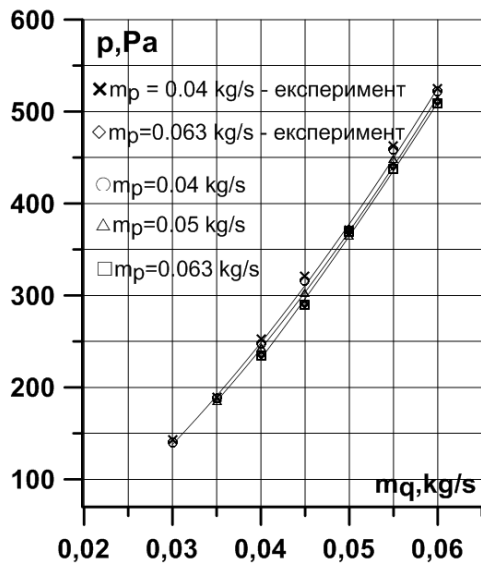


Фиг. 4. Загуби на налягане при въздух

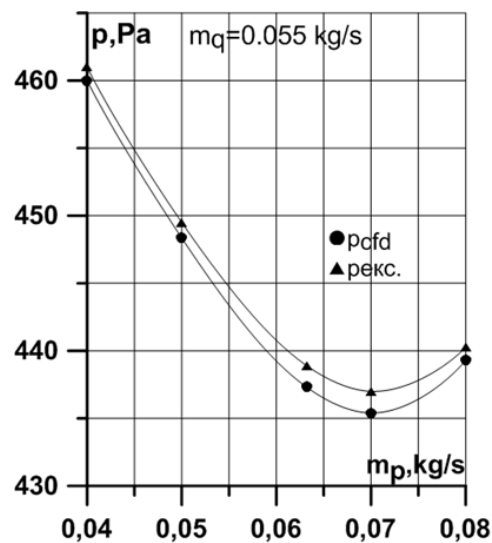
Първоначално са направени числени симулации за определянето на налягането на входа на пневмоциклона само за течение на газ, като за целта са зададени различни масови дебита на газа за изчислителни мрежи с различен брой елементи, които са сравнени с експериментално получените данни на фиг. 4. От показаните резултати могат да се направят следните изводи:

- Както може да се очаква, с увеличаване на масовия дебит на газа, което при приетата несвиваемост съответства на увеличаване на средната му скорост, загубите на налягане в пневмоциклона нарастват по квадратична зависимост.
- При увеличаване на елементите на изчислителната мрежа от 55 374 на 68 441 получаваме сравнително точно съвпадение между експеримента и компютърната симулация.

Следващ етап е да се установи влиянието на масовия дебит на твърдата фаза върху налягането на входа на циклона. За целта са направени числени и експериментални изследвания за три масови дебита на частиците  $m_p = 0.04, 0.05, 0.063$  kg/s. Резултатите са показани на фиг. 5. На следващата фигура фиг. 6 са показани загубите на налягане като функция на масовия дебит на твърдата фаза  $m_p$  при постоянен масов дебит на газа на входа  $m_q = 0.055$  kg/s.



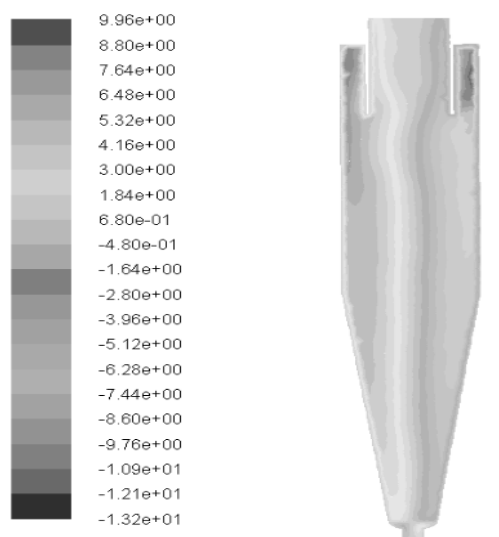
Фиг. 5. Загуби на налягане при газ-частици



Фиг. 6. Влияние на масовия дебит  $m_p$

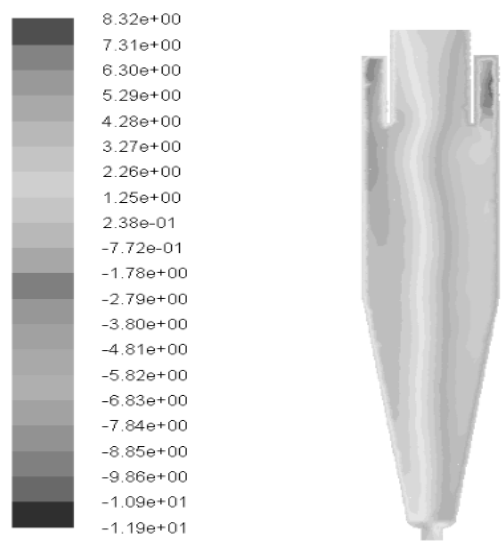
Могат да се направят следните изводи:

- При увеличаване на масовия дебит на газовата фаза при постоянен масов дебит на твърдата фаза, загубите на налягане се увеличават - фиг. 5.
- При постоянен масов дебит на газовата фаза на входа на циклона, фиг. 6, с увеличаването на концентрацията на частиците, т. е. увеличаване на масовия им дебит, загубите на налягане намаляват до определена стойност, след което започват да нарастват. Това явление може да се обясни с намаляването като цяло на тангенциалната компонента на скоростта на газа в циклона, което е причинено от влиянието на твърдата фаза върху полето на скоростта. Именно тангенциалната скорост определя загубите от хидравлично триене.
- Разликата между експерименталните и числено получените резултати е не повече от 2% - фиг. 5 и фиг. 6.
- Разликата между максималната и минималната стойност на налягането, при промяна на дебита на твърдата фаза в изследвания диапазон от коефициенти на натоварване, не надвишава 5 %, фиг. 6, което дава основание при численото моделиране, когато трябва да се направи една по-бърза оценка на загубите на налягане, да не се отчита влиянието на твърдата фаза върху полето на носещата фаза т. е. да се приложи еднопосочно влияние (one-way coupling).
- На фиг. 7 и фиг. 8 е показано изменението на тангенциалната скорост в едно сечение през оста на циклона, при постоянен разход на газа  $m_q = 0.055 \text{ kg/s}$  и масови дебити на твърдата фаза съответно  $m_p = 0.04 \text{ kg/s}$  и  $m_p = 0.063 \text{ kg/s}$ , на които отговарят коефициенти на натоварване съответно  $\mu = 0.72$  и  $\mu = 1.14$ . При по-големият дебит на твърдата фаза, максималната тангенциална скорост намалява от 10 на 8.3 m/s. Посоченият ефект се нуждае от допълнително изследване, тъй като, както вече бе споменато, над определена стойност на масовия дебит на частиците загубите започват да нарастват.



Contours of Tangential Velocity (m/s)  $m_q=0,055 \text{ kg/s}$

**Фиг. 7. Тангенциална скорост  $\mu=0.72$**



Contours of Tangential Velocity (m/s)  $m_q=0,055 \text{ kg/s}$

**Фиг. 8. Тангенциална скорост  $\mu=1.14$**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите от представеното изследване показват, че изчислителната механика на флуидите (CFD) може да се използва успешно за определянето на хидравличните загуби в пневмоциклон. Чрез проведените експерименти, които бяха сравнени с резултатите от числените симулации се установи, че RNG  $k-\varepsilon$  модел на турбулентност и Ойлер-Лагранжевия подход за моделиране на дискретната фаза осигуряват достатъчна за практиката точност при определяне на загубите на налягане. При относително малки коефициенти на натоварване по (2), което е характерно за пневмотранспорт в суспендирано състояние, влиянието на твърдата фаза върху полето на скоростта на газа, а от тук и върху загубите на налягане може да се пренебрегне при необходимост от една по-бърза оценка, защото изисква много по-малко изчислителни ресурси, а осигурява задоволителна точност.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bernardo, S., M. Mori. 3D Simulation of gas flow in a cyclone using a commercial CFD code. *17<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering* November 10-14, 2003, Sao Paulo, SP.
- [2] Quian, F., Z. Huang. Numerical study of the separation characteristics in a cyclone of different inlet particle concentrations. *Computers and Chemical Engineering* 31 (2007) 1111–1122.
- [3] Taneva, D. CFD Modeling of a gas cyclone, 11th International course for young researchers “Computational Engineering”, Pamporovo, Bulgaria, 26-30 May, 2015, page 126-128
- [4] ANSYS Fluent. Theory Guide.
- [5] Дуков, И., В. Василев. Изследване на пневмотранспорт на гранулирани материали. *Научна конференция ЕМФ`2011. Сборник с доклади, том II. Созопол, 2011.*
- [6] Дуков, И. Числено моделиране на пневмотранспорт в суспендирано състояние в дълъг хоризонтален тръбопровод с ANSYS FLUENT. *Научна конференция ЕМФ`2011. Сборник с доклади, том II. Созопол, 2011.*

*Изложените в доклада резултати са получени по проект, финансиран от субсидията за научни изследвания в ТУ – София.*

ИВАН НЕДЕЛЧЕВ ДУКОВ, доцент, д-р инж., idukov@tu-sofia.bg

ДИАНА ПЛАМЕНОВА ТАНЕВА, маг. инж., dtaneva@tu-sofia.bg

Технически университет – София, кат. “Хидроаеродинамика и хидравлични машини”