

Маг. инж. Диана Пламенова Танева

ИЗСЛЕДВАНЕ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТ В СУСПЕНДИРАНО СЪСТОЯНИЕ

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен "ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1 Машинно инженерство

Научна специалност: Хидравлични и пневматични машини и съоръжения.

Научен ръководител: доц. д-р Иван Дуков

СОФИЯ, 2018 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра "Хидроаеродинамика и хидравлични машини" към Факултет Енергомашиностроителен на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 21.11.2017г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 20.03.2018 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-361 / 11.12.2017 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. доц. д-р инж. Ангел Костадинов Терзиев – председател

2. доц. д-р инж. Иван Неделчев Дуков- научен секретар

3. проф. д.т.н. инж. Иван Славейков Антонов

4. доц. д-р инж. Вълко Маринов Кичев

5. доц. д-р инж. Тодор Николов Чакъров

Рецензенти:

1 доц. д-р инж. Ангел Костадинов Терзиев

2. проф. д.т.н. инж. Иван Славейков Антонов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет Енергомашиностроителен на ТУ-София.

Дисертантът е редовен докторант към катедра "Хидроаеродинамика и хидравлични машини" на факултет Енергомашиностроителен. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Диана Танева Заглавие: Изследване за повишаване на енергийната ефективност при пневмотранспорт в суспендирано състояние Тираж: 30 броя Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

І. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Пневматичният транспорт се среща в почти всички индустриални системи и съоръжения, използващи прахообразни или гранулирани материали. В практиката успешно се транспортират частици с размери поголеми от 1 mm, като се използва пневмотранспорт в суспендирано състояние. Поради своето естество, пневмотранспортът защитава околната среда от продукта и обратно.

Счита се, че пневмотранспортът в суспендирано състояние не е енергийно ефективен метод, поради значителните разходи за производство на сгъстен въздух. Изследванията на организации, свързани с енергийната ефективност показват, че в развитите в индустриално отношение страни за производство на сгъстен въздух се консумира между 10 и 20% от електроенергията, изразходвана за промишлени нужди. Поради значителните разходи за генериране на сгъстен въздух за поддържане на високите скорости на транспортиране се счита, че пневмотранспорта в суспендирано състояние не е енергийно ефективен метод. Въпреки това, методът е лесен, удобен и гъвкав за адаптиране към различни условия на работа. Често системите за пневмотранспорт не работят в оптималния си режим, което се дължи на недоброто разбиране на работния процес и липсата на достъпни и достатъчно надеждни данни и методи за оразмеряване и изследване на подобни съоръжения. От друга страна, с развитието на компютърната техника през годините, значително се улеснява и съкращава времето за подробно изследване на системите за пневмотранспорт чрез модулите за числено моделиране (ANSYS FLUENT, ANSYS CFX, STAR-CD, FLOW-3D, PHOENICS). Следователно, чрез съвместното използване на численото и експерименталното изследване на работния процес на тези системи е възможно постигане на намаляването на разходите за енергия. В последствие увеличаването на тяхното използване в производствените процеси е напълно постижима цел.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Основната цел на дисертационния труд е въвеждане на критерии за енергийна ефективност при пневмотранспорт в суспендирано състояние и разработване на методи за повишаването й чрез оптимален избор на основните геометрични и аеродинамични параметри на системата. Във връзка с осъществяването й се предвижда решаването на следните основни задачи:

1. Усвояване на принципа на действие и работата със съществуваща уредба за пневмотранспорт в суспендирано състояние.

2. Провеждане на експериментални изследвания с лабораторната система за определяне на основните параметри и характеристики на

двуфазното течение, които са необходими за валидиране на числения модел на системата.

3. Числено моделиране на съществуващата система за пневмотранспорт и определяне на загубите на налягане при протичането на чист газ и смес газчастици през системата. Валидиране на получените резултати.

4. Експериментално и числено изследване на движението на твърдата фаза при различни скорости на газовия поток. Разработване на методика за определяне на средната скорост на частици в тръба. Валидиране на числения модел.

5. Числено моделиране и валидиране на загубите на налягане и ефективността на пневмоциклон, който представлява основна част от всяка една система за пневмотранспорт.

6. Формулиране на критерии за енергийна ефективност на системите за пневмотранспорт в суспендирано състояние.

7. Числени и натурни експерименти за определяне на оптималните параметри, от гледна точка на енергийната ефективност на системата.

8. Разработване на обобщени методи за проектирането на енергийно ефективни системи за пневмотранспорт в суспендирано състояние.

Практическа приложимост

С получените резултати от този дисертационен труд може да се проектират енергийно ефективни системи за пневмотранспорт в суспендирано състояние чрез осъществяването на оптимален избор на основните геометрични и аеродинамични параметри на системата.

Апробация

Основните резултати са публикувани и докладвани на:

• 20 Научна конференция с международно участие ЕМФ, Созопол, 2015

•11th International course for young researchers "Computational Engineering", Pamporovo, Bulgaria, 26-30 May, 2015

•21 Научна конференция с международно участие ЕМФ, Созопол, 2016

•Национална конференция с международно участие Сливен,2016

•22 Научна конференция с международно участие ЕМФ, Созопол, 2017

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 8 научни статии, от които 2 самостоятелни.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 130 страници, като включва увод, 3 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 69 литературни източници, като 60 са на латиница и 6 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 62

фигури и 9 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ВЪВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМА И ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

1.1. Въведение

Двуфазния поток газ-частици при системи за пневмотранспорт в суспендирано състояние има сложен характер, което се дължи на множество фактори. Характерно при транспортиране на сравнително "едри" материали е, че движението им се влияе пренебрежимо малко от турбулентните пулсации на носещата фаза, като основно влияние оказват силите на теглото. В последствие частиците се групират при транспортирането си в хоризонталните участъци в долната част на тръбопровода. Влияние върху движението им оказват и ударите на частиците помежду им и със стените на тръбата. Следователно, за да се осигури надежден и непрекъснат процес на транспортиране, са необходими сравнително високи скорости на газа до 35 m/s. В резултат от това скоростта на частиците е от 10 до 30 m/s. Поради значителните разходи за производство на сгъстен въздух за поддържане на високите скорости на транспортиране се счита, че пневмотранспорта в суспендирано състояние не е енергийно ефективен метод. Оптималния избор на основните параметри на системите, постигнат чрез съвместното използване на числени и експериментални изследвания, ще позволи да се осъществи значителна промяна върху крайното потребление на енергия необходимо за транспортиране на насипния материал в суспендирано състояние.

1.2. Основни елементи и параметри на системите за пневмотранспорт в суспендирано състояние. Числено моделиране на двуфазното течение газ-частица.

Разгледани са основните елементи и параметри на системите 3a пневмотранспорт в суспендирано състояние, определящи процеса на транспортиране, които са обект на изследване или се използват най-често в целия дисертационен труд. При всеки един конкретен случай използването им ще се възприема дефиницията, която е дадена в тази част от дисертацията. В допълнение са дадени и най-често използваните материали, изисквания и особености при експлоатацията на транспортиращия тръбопровод и колената на системите. Въвежда се и метода за численото моделиране на двуфазното течение газ-частица, който се използва като основно средство при симулирането на движението на транспортирания материал през системите за пневмотранспорт.

1.3. Литературен обзор и анализ на досегашните резултати.

В обобщение на изложеното от разгледания литературен обзор могат да се направят следните изводи:

1. Най-много и най-подробно са изследвани начините за определянето на критичната скорост. Това се дължи на факта, че посредством правилното й определяне може да се реализира успешно процеса на транспортиране на частиците и да се повиши енергийната ефективност на системите.

2. Въпреки съществуването на множество научни публикации по отношение на определянето на основните параметри на системите за пневмотранспорт, както и тяхното влияние върху процеса на транспортиране, все още не съществува обобщен и лесно приложим критерий за определяне на енергийната ефективност на системите. Следователно този проблем се нуждае от по-нататъшно изследване.

3. От по-нататъшни изследвания се нуждае и проблемът за влиянието на характеристиките на твърдата фаза върху точността на числения модел на системите за пневмотранспорт в суспендирано състояние, както и откриването на лесно приложими съвременни методики за определянето им.

4. Съществува изключително голямо разнообразие от публикации по отношение на приложението на CFD в системите за пневмотранспорт в суспендирано състояние, но много малко от тях са свързани конкретно с основните параметри на течението влияещи върху енергийната ефективност на системите.

ГЛАВА 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО И ЧИСЛЕНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИСТЕМИТЕ ЗА ПНЕВМОТРАНСПОРТ. ВАЛИДИРАНЕ

2.1. Общи бележки

В тази част от дисертационния труд се разглежда подробно принципа на действие и основните елементи на съществуваща в лабораторията на катедрата уредба за пневмотранспорт, като се определят експериментално разхода на газа и основните характеристики на транспортирания материал.

Разглежда се проблема за определяне на формата на частиците и обосновка на изборът на твърда фаза за транспортиране. Определянето на формата се осъществява чрез съвместното използване на експериментални изследвания, теоремата на Коши за осреднената проектна площ на изпъкнали частици и специализиран софтуер за анализ на изображения.

Реализира се численото моделиране на системата за пневмотранспорт и се определят загубите на налягане при протичането само на газ и на двуфазната смес газ-частици през нея, като получените резултати се валидират посредством извършените експериментални изследвания.

Разработва се методика за определяне на средната скорост на частици в тръба като се използва фотографска и стробоскопска техника. Осъществява се експерименталното и численото изследване на движението на твърдата фаза при различни скорости на газовия поток с помощта на разработената методика. Числено се моделира и валидира пневмоциклона, който е част от опитната уредба на използваната система за пневмотранспорт в суспендирано състояние.

2.2. Опитна уредба и принцип на действие

Експерименталните изследвания са проведени на стенд в лаборатория "Хидро – пневмотранспорт и водопречистващи устройства" към Технически университет – София. Схемата и общия изглед на опитната уредба са показани на фиг. 2.1



Фиг. 2.1.

Тръбният транспорт е реализиран по схема на нагнетяване, като твърдата фаза преминава по затворен контур в стенда, докато газообразната (въздухът) се засмуква от и връща към атмосферата. Въздухът се засмуква от атмосферата през входящия измервателен колектор на тръбопровода 1, снабден с точки за присъединяване на вакуумметър 2 и термо-анемометър 3. Центробежния вентилатор за високо налягане 4 подава въздуха в напорния тръбопровод, като той се задвижва от асинхронен двигател 5. Честотата на въртене на електродвигателя се управлява чрез честотен инвертор 6. Твърдата фаза започва движението си от захранващ бункер с конусно дъно 8, барабанен дозатор 9 се подава посредством пластинков откъдето гравитационно в напорния тръбопровод. Дозаторът 9 се задвижва с постояннотоков електродвигател 10, чиято честота на въртене се задава посредством стабилизиран източник на напрежение 11. Двуфазната среда преминава по затворен контур от тръби 12. Затвореният контур е с достатъчен брой елементи, позволяващи да се реализират различни конфигурации, с различни дължини на отделните участъци и различен вътрешен диаметър. По дължината на отделните участъци се намират изводи за присъединяване на измерители на налягане (манометри). Изводите съответно за измерване на налягането на изхода и на входа са 7 и 15, като те са затворени когато не се извършва измерване. В затворения контур са вградени и тръбни участъци 13 и 14 с прозрачни стени, които позволяват визуално наблюдение на течението. Чрез използването им се позволява да се наблюдава течението и да се приложат оптични методи за определяне на траекториите и скоростите на частиците. В края на движението си твърдата фаза се отделя от въздуха посредством циклонния сепаратор 16. Твърдата фаза от циклона попада чрез центробежната и гравитационната сила в тегловно измервателната система 17, откъдето се връща в захранващия бункер 8.

2.3. Експериментално определяне на основните аеродинамични параметри на опитната уредба и характеристики на твърдата фаза.

В тази част от дисертацията основната цел е експерименталното определяне на основните аеродинамични параметри на съществуващата опитна уредба за пневмотранспорт в суспендирано състояние и характеристиките на твърдата фаза, които са необходими за реализирането на числения модел на системата.

2.3.1. Определяне на разхода на газа посредством скоростния профил на течението

Обемният дебит, който преминава през смукателния тръбопровод, се намира от сечението на тръбопровода S и средната скорост на газа U_{a} :

$$Q_g = SU_g. \tag{2.1}$$

Средната скорост U_a се определя по зависимостта:

$$U_g = \frac{\sum_{i=1}^{i} U_i y_i}{y}, \qquad (2.2)$$

където U_i е скоростта на газовата фаза измерена в определено сечение S_i , с диаметър y_i от смукателния тръбопровод с общ диаметър у, за дадена честота на въртене f, Hz, която се регулира чрез честотния инвертор 6, фиг. 2.1.

Измерването на U_i в отделните сечения се осъществява чрез анемометър с термосонда за скорости 0.15-30 m/s.

Измервателната сонда се позиционира на определените места по диаметъра на колектора y_i . Определени са профилите на скоростта за смукателния тръбопровод за всеки един режим на работа на вентилатора f = 30;35;40;45;50 Hz.

2.3.2. Избор на твърда фаза. Определяне на основните параметри и характеристики на твърдата фаза

Твърдата фаза, която е определена като най-подходяща за провеждането на експериментални и съответно последващи числени изследвания, е

полипропилена. Избрания вид на транспортирания материал е сходен по размер и плътност с реално използваните в редица производствени процеси. Същевременно полипропиленовите гранули притежават по-висока якост и по-висока твърдост за разлика от материалите, които се транспортират в практиката. По този начин се гарантира провеждането на редица експериментални изследвания без опасност от разрушаване на твърдата фаза и в последствие прекъсване на процеса на работа на системата за пневмотранспорт.

Масовия дебит на твърдата фаза q_p се определя чрез тегловно измервателна система (поз.17) фиг. 2.1. Количеството подаван масов дебит на твърдата фаза се регулира чрез честотата на въртене на дозаторът (поз. 9), която се определя чрез промяна на напрежението на стабилизирания източник (поз. 11), фиг. 2.1.

Стойностите на измерените осреднени масови дебити на твърдата фаза за всеки един режим на работа на системата, както случайните и относителните грешки, са дадени в табл. 2.2.

$q_{ ho}^{}$, kg/s	$\Delta m_{ m p},$ kg/s	ε,%
0.01	0.000275	2.33
0.04	0.001446	3.39
0.06	0.004873	6.62
0.08	0.00368	4.24
0.09	0.00451	4.58

Табл. 2.2.

Чрез прецизна лабораторна везна и пикнометър се измерва общата маса 11.852 g и плътността 0.876 g/cm³ на 400 несферични полипропиленови частици. За масата и обема на отделната частица се получава $m_p = 0.0218$ g и $V_p = 0.0248$ cm³. За обема е валиден израза $V_p = 4\pi r^3/3$, откъдето се определя радиуса *r* респективно еквивалентния диаметър на частицата $d_p = 3.6$ mm.

Освен еквивалентния диаметър и плътността на отделната частица, коефициента на формата има значително влияние върху моделирането на твърдата фаза чрез средствата на метода Ойлер-Лагранж известен в средата на ANSYS Fluent като DPM модел (Discrete Phase Model). Основната цел е определянето на коефициента на формата Γ (1.26), който е необходим за пресмятането на уравнението за силите действащи на несферична частица и включената в него съпротивителна сила.

$$\Gamma = \frac{S_{sp}}{S_p},\tag{1.26}$$

където S_{sp} е лицето на повърхнина на сфера със същия обем като на реалната частица, а S_p е лицето на повърхнина на реалната частица.

Чрез анализа на изображения не е възможно да се определят директно параметрите от уравнението (1.26) на фактора на формата S_{sp} и S_p . Поради тази причина лицето на повърхнина на сфера със същия обем на частицата S_{sp} се определя чрез определения предварително еквивалентен диаметър на частицата $d_p = 3.6$ mm. Окончателно за S_{sp} се получава 40.6 mm².

За да се определи лицето на повърхнината на реалната частица S_{ρ} се прилага теоремата на Коши, която гласи, че средната проектна площ A_{ρ} на произволно ориентирани изпъкнали частици е една четвърт от средната повърхностна площ на тези частици :

$$A_{\rho} = \frac{S_{\rho}}{4}.$$
 (2.5)

Анализът на изображенията позволява да се определят 2D параметрите на частиците, включително осреднената проектна площ на тези частици A_{ρ} , а след това непосредствено се пресмята действителната площ на частиците S_{ρ} по (2.5), като крайният резултат е факторът на формата (степен на сферичност). За да може да се приложи теоремата на Коши е необходима произволна ориентация на частиците. Съответно са осъществени два начина на фотографиране на частиците: върху равна повърхност и в смес от етанолвода. При първия начин не е изпълнено условието за произволна ориентация, за разлика от втория. Чрез помощта на специализирания софтуер за анализ на изображения ImageJ се определя фактора на формата за двата случая на фотографиране, като съответно се осъществява определяне на процентната разлика между получените резултати.

При първия начин на фотографиране на частиците силата на тежестта оказва влияние върху тяхното устойчиво равновесно състояние. Изпъкналите едри частици са в устойчиво равновесно състояние, когато притежават минимална потенциална енергия. Това означава, че частиците са в устойчиво равновесие върху гладката повърхност, когато центърът им на тежестта лежи най-ниско. В резултат на това, изискването за произволна ориентация налагано от теоремата на Коши не е изпълнено. За да се отстрани този недостатък, частиците се поставят в смес от етанол и вода. Ако частицата има същата плътност като течността, то Архимедовата сила ще бъде равна на силата на тежестта. Тогава частиците ще останат потопени в течността и нито ще потънат, нито ще изплуват на повърхността. По този начин може да се постигне напълно случайната им ориентация.



Фиг. 2.10.

Плътността, която се постига на сместа етанол-вода, е в диапазона 0.789÷0.998 g/cm³ и от 65% етанол и 35% вода се реализира плътност 0.877 g/cm³. Също така етанол-глицерин сместа включва плътността на частицата в диапазона 0.789÷1.26 g/cm³.

Експерименталната постановка на този метод е показана на фиг. 2.10. 207 полипропиленови частици се поставят в прозрачен правоъгълен контейнер запълнен със смес от етанол-вода с плътност еквивалентна на твърдата фаза. Мащаб с определена дължина е поставен на задната стена на контейнера.

Заснетото изображение е показано на фиг. 2.11. Анализът на изображения включва аналогично същата последователност на изпълнение, както при заснемането на частиците върху равна повърхност.

Излишната информация от изображението, както и припокриващите се частици се изрязват. Изходът от програмата ImageJ е показан на фиг. 2.12. Стойността на осреднената проектна площ се измерва (13.12 mm²) и чрез използването на теоремата на Коши се получава $S_p = 52.49 \text{ mm}^2$, като след това за фактора на формата се получава 0.77.



Фиг. 2.11.

Фиг. 2.12.

Разликата между стойностите получени за фактора на формата между двата начина на фотографиране е 10%, като окончателно се възприема стойността 0.77 за фактор на формата в по-нататъшните изследания извършени в настоящата дисертация.

2.4. Числено моделиране на системата за пневмотранспорт и определяне на загубите на налягане при преминаването на газ и газ-частици. Валидиране.

2.4.1. Числен модел на съществуващата система за пневмотранспорт

В ANSYS FLUENT Design Modeler е моделирана геометрично лабораторната нагнетателна система за пневмотранспорт на гранулирани материали. Тя се състои от входен участък с диаметър 90 mm, два хоризонтални и един вертикален участък с вътрешен диаметър на РVC тръбопровода 46.5 mm, като основните размери в mm са дадени на фиг. 2.13.

Изчислителната мрежа е неструктурирана. Сгъстяването на изчислителната мрежа продължава до постигане на независимост на решението от броя на елементите. Изпълняването на това условие е необходимо за коректното провеждане на всяко едно CFD моделиране. Окончателно изчислителната мрежа е съставена от 1 633 350 елемента. На следващата фигура фиг. 2.14 е показан вида на използваната мрежа.



Фиг. 2.13.



Фиг. 2.14.

За да бъде реализирано адекватното моделиране до стената е необходимо изчислителната мрежа да обхване с достатъчен брой елементи течението в близката околност. За да се осъществи това е необходимо безразмерното разстояние y_{ρ}^{+} до средата на елемента граничещ със стената да

бъде със стойност 1. За целта до стената е генериран слой от 4 призматични елемента.

При извършването на изчислителните симулации с газ-твърда фаза за моделирането на частиците се използва подхода на Ойлер-Лагранж, който е познат в ANSYS FLUENT като Discrete Phase Model. 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). Въздухът се приема за несвиваем, с постоянна плътност и вискозитет, което поради ниските числа на Max < 0.1 и сравнително малкото изменение на налягането от входа до изхода е напълно приемливо.

Използван е RNG k-є турбулунтен модел при изчисленията с газ и газчастици, като граничните условия са: на входа – масов дебит на въздуха; на изхода – произволно налягане, тръбата е неподвижна стена с пълна полепваемост на флуида. В средата на ANSYS Fluent дискретната фаза се моделира, като се задават: експериментално определения масов разход q_{ρ} , диаметъра на частицата $d_{\rho} = 3.6$ mm, плътността $\rho_{\rho} = 876$ kg/m³ и началните условия за инжектиране на частиците. В случая, последните се въвеждат равномерно по цялото входно сечение на тръбопровода с начална скорост 0 m/s, като те се ускоряват в началния участък на системата до достигане на определена установена стойност. Изчисляват се 270 траектории, като всяка една от тях представлява група частици с еднакви начални условия. Не се отчита влиянието на турбулентната дисперсия, защото в дисертационния труд частиците, които се разглеждат, са достатъчно големи и инертни и не се увличат от турбулентните пулсации.

При компютърната симулация също така се отчита силата на тежестта на частиците, задава се степента на сферичност на частицата $\Gamma = 0.77$, както и тангенциалния e_t и нормалния коефициент на възстановяване e_n на скоростта.

Използваният компютър е с четириядрен процесор, 2.4 GHz и паралелна организация на изчисленията.

2.4.2.Числено и експериментално определяне на загубите на налягане при протичането на газ.

Загубите на налягане определени експериментално се измерват чрез цифров диференциален манометър поз. 15 и 7 фиг. 2.1 с обхват 0 – 100 hPa за всеки един режим на работа на системата, който се определя чрез промяна на честотата посредством честотния инвертор.

Осъществено е валидиране на резултатите от CFD с експерименталните данни само при преминаването на въздух през системата, като резултатите са показани на табл. 2.3 и са изобразени графично на фиг. 2.15.

От получените резултати за загубите на налягане за въведените на входа на системата експериментално определените масови дебити на газовата фаза, могат да се направят следните изводи:

1.От фиг. 2.15 се вижда че с нарастване на масовия дебит, загубите на налягане се увеличават приблизително правопропорционално на квадрата на скоростта на газа;

2. Максималната процентна разлика между получените числени и експериментални резултати е 4%, което се възприема като абсолютно задоволително за инженерната практика.

$oldsymbol{q}_{g}$, kg/s	р _{екс} ,Ра	$ ho_{\scriptscriptstyle CFD}$,Pa	% разлика
0.041	1198	1250	4.3
0.048	1600	1667	4.1
0.055	2090	2124	1.6
0.062	2600	2648	1.8
0.069	3179	3222	1.3

Табл. 2.3.



2.4.3. Числено и експериментално определяне на загубите на налягане при преминаването на газ-частици.

Загубите на налягане ce определят чрез измерването на пада на налягане поз.7 и поз.15 за различни скорости респ. масови дебити на газа натоварване режими на И на системата чрез промяна на честотата въртене на дозатора ПОЗ. 9 на посредством стабилизирания източник на напрежение поз. 11, фиг. 2.1.

Сходимостта на решението при течението газ-частици се получава за около 3000 итерации и паралелна организация на изчисленията и отнема около 100 min Определя се влиянието на масовия дебит на частиците върху загубите на налягане в системата за пневмотранспорт. Получените резултати са сравнени с експерименталните табл. 2.4, като могат да бъдат направени следните изводи:

1. При различните режими на натоварване на системата $q_p = 0.01; 0.04; 0.06; 0.08; 0.09 \text{ kg/s}$ при постоянен масов дебит на газовата фаза $q_q = 0.04 \text{ kg/s}$ се вижда, че с увеличаване на концентрацията на твърди

частици, нарастват и загубите на налягане в системата. Увеличаването на масовия дебит на твърдата фаза съответно увеличава броя на ударите на частиците със стените на тръбопровода и това води до нарастване на загубите;

2. С увеличаване на скоростта на газа респективно масовия дебит на газа, загубите на налягане за различните режими на натоварване на системата q_p се увеличават. Съвпадението на получените резултати е напълно приемливо за инженерната практика – 2%.

$q_{_g}$, kg/s	$q_{_p}$, kg/s	$p_{e\kappa c}$, Pa p_{CFD} , Pa		% разлика
0.0177		1157.17	1139	1.5
0.0376		1559.24	1540	1.2
0.040	0.01	2078.9	2055	1.1
0.057		2598	2550	1.8
0.064		3178	3197	0.59
0.0323		2020	2012	0.39
0.040	0.04	2549	2537	0.47
0.055		3177.3	3152.41	0.79
0.0225		2128.03	2120	0.37
0.040	0.06	2688	2650	1.4
0.0503		3108.69	3101.6	0.22
0.0186	0.08	2530.1	2527.3	0.11
0.04		3118.49	3112.79	0.19
0.04	0.09	3187.14	3179.10	0.25

Табл. 2.4.

2.5. Експериментално и числено изследване на движението на твърдата фаза при различни скорости на газовия поток.

Изследването на осреднената компонента на скоростта се осъществява експериментално и числено. Първият начин се реализира посредством цифрова фотографска и стробоскопска техника (фотографиране с импулсна или с постоянна светлина), чрез която в лабораторни условия се определя осреднената осева компонента на движението на частиците. Фотографирането с импулсна светлина се осъществява чрез осветяване на двуфазния поток посредством стробоскоп, като неговите технически характеристики определят начините на измерването и изчисляването на скоростта. Характерно за този метод е, че той може да се използва при помалки концентрации на твърдата фаза. При фотографиране с постоянна светлина се осъществява заснемане на траекторията на частицата във вид на

щрих, който има дължина зависеща от времето за експонация на фотокамерата. Времето трябва да бъде достатъчно дълго, за да се осъществи значително преместване на частицата и малка относителна грешка при измерване на дължината. За правилното задаване на времето трябва да се избере стандартна стойност, която да съответства на конкретния модел фотоапарат. При определяне на изминатия път трябва да се оцени дължината на частицата в направление на движението, като това зависи основно от правилността на формата на полученото изображение.

В обобщен вид последователността, която трябва да бъде изпълнена и при цифрово фотографиране с импулсна или постоянна светлина, за да се определи правилно средната скорост на частиците в тръба е следната:

1. Оценява се първоначално средната скорост на частиците U_p за всяка една стойност на зададената средна скорост на газа U_g по израза $U_p = (0.4 \div 0.6)U_q$.

2. Определя се честотата на стробоскопа z, като общото времетраене на периода на действието t е сума от светлинен импулс с времетраене t_i и тъмен участък t_d . Основно изискване е да се разполага с поне три положения на частицата, като по този начин се улеснява нейната идентификация.

3. Определя се времето за експонация на фотокамерата T_e , която трябва да отговаря на условието $T_e > 2t$. При избор на бленда на фотокамерата трябва да се избират по-малки отвори, за да може да има по-голяма дълбочина на полето, което гарантира че повечето частици ще бъдат с приемлива яркост.

Чрез обработка на полученото изображение се определя дължината на изминатия път, а от там и скоростта на частицата. Предварително известната дължина на използвания мащаб се съотнася към еквивалентния брой пиксели, след което се измерва разстоянието между две точки. Валидирането на получените резултати с програмите за CFD се постига посредством опитни данни. Получените експериментално чрез импулсна и постоянна светлина, осреднени стойности на скоростта на твърдата фаза, се сравняват с резулатите от CFD при еднакви режимни параметри на работа на системата за хоризонтален и вертикален тръбопровод. На фиг. 2.26 и фиг. 2.27 са показани резултатите от численото моделиране сравнени с тези от експеримента за хоризонтален и вертикален тръбопровод.

Вижда се, че резултатите от компютърната симулация са с по-високи стойности от експерименталните. Въпреки това, резултатите се приемат като напълно задоволителни за инженерната практика.





В рамките на тази част от дисертационния труд са направени числени симулации за определяне на загубите на налягане в циклона за течения на чист газ и газ-твърда фаза, които са сравнени с действително получените стойности. След това се определя и ефективността на пневмоциклона чрез средствата на ANSYS FLUENT, поради невъзможността да бъде определена експериментално за конкретната уредба. Приема се, че валидирането на числено получените загуби на налягане с експерименталните е необходимо и достатъчно доказателство за истинността на получените резултати и по отношение ефективността. За апроксимация на резултатите относно ефективността от ANSYS FLUENT се използват изкуствени невронни мрежи (ИНМ).

2.6.1. Принцип на действие и геометрия на пневмоциклона

Характерното за пневмоциклона е, че за отделянето на частиците от газа се използва центробежната и гравитационната сила. Съществуващия пневмоциклон е с тангенциален вход, като основните геометрични размери на пневмоциклона са показани на фиг. 2.29 и са дадени в mm в табл. 2.5.

D _s	D_i	D _e	D	D _d	Н	h	S	L _a	L _b	L _c
46.5	110	150	255	40	1100	570	160	550	300	200

Табл. 2.5.



Фиг. 2.29.

2.6.2.Числен CFD модел на пневмоциклона

Изчислителната мрежа е неструктурирана и съставена от 68 441 елемента. Извършват се числени симулации при протичане само на газ и при течение газ-твърда фаза. И при двата случая се използва RNG k-є турбулентен модел, при който ефектът от завъртането на течението е включен при изчисляването на турбулентния вискозитет, като е прието течение в условията на хидравлически гладка тръба.

Моделът на турбулентност с Рейнолдсови напражения (Reynolds stress model, RSM) е по-подходящ за силно изразеното вихрово течение в циклоните, но извършените опити показаха, че за да се получи сходимост на поставените задачи, те трябва да се решават като нестационарни, с достатъчно малка стъпка по време, което удължава значително изчислителното време. Поради тази причина моделът не е подходящ за решаването на поставените задачи – определянето на загубите на налягане и ефективността на пневмоциклона.

Граничните условия при численото моделиране на пневмоциклона са: на входа – зададен масов дебит на газа, който се изменя в диапазона $q_g = 0.0225 \div 0.064$ kg/s; на двата изхода на циклона – атмосферно 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. В уравнението за движение на частицата в газовия поток са отчетени само съпротивителната и гравитационната сила.На входа на циклона се задава съответния масов дебит на твърдата фаза, който е определен експериментално при зададен дебит на газа и се изменя в

диапазона $q_p = 0.04 \div 0.063$ kg/s. За дискретната фаза се задава степента на сферичност $\Gamma = 0.77$ и се приема, че взаимодействието между частиците и стените не е идеално еластично, като се задават тангенциалния и нормалния коефициент на възстановяване на вектора на скоростта.

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.

2.6.3. Определяне на загубите на налягане в пневмоциклона. Валидиране на получените резултати.

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 дебити на газа, за изчислителни мрежи с различен брой елементи, които са сравнени с експериментално получените данни на фиг. 2.33.



От показаните на фиг. 2.33 резултати могат да се направят следните изводи:

1.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.

2. 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 $q_p = 0.04$; 0.05; 0.063 kg/s. Резултатите са показани на фиг. 2.34. На

следващата фигура фиг. 2.35 са показани загубите на налягане като функция на масовия дебит на твърдата фаза при постоянен масов дебит на газа на входа $q_a = 0.055$ kg/s.

От получените резултати могат да се направят следните изводи:

1. При увеличаване на масовия дебит на газовата фаза при постоянен масов дебит на твърдата фаза, загубите на налягане се увеличават - фиг. 2.34.

2.При постоянен масов дебит на газовата фаза на входа на циклона, фиг. 2.35, 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.



3. 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. 2.35.

2.6.4. Моделиране на ефективността на пневмоциклона чрез CFD

Моделира се само конкретна конфигурация на циклон, отговаряща на наличния в лабораторията. Численото моделиране с променлива плътност на газа, по отношение на

ефективността, не показа забележима разлика. Натоварването на циклона с частици на практика е малко (3-5%), което дава възможност да се пренебрегне влиянието на масовия дебит на частиците. Центробежните инерционни сили действащи върху частиците са многократно по-големи от гравитационните. В резултат на всичко гореспоменато се получава, че ефективността на конкретен циклон зависи само от три величини :

$$\eta = f(d_{\rho}, \rho_{\rho}, U_g). \tag{2.18}$$

За определянето на ефективността се проследяват траекториите на 60 частици с различни диаметри $d_p = 0 \div 12 \,\mu\text{m}$, равномерно разпределени по цялото входно сечение. В циклона постъпват частици на брой z_f . Част от тях не могат да бъдат отделени, а z_c на брой се сепарират от циклона и ефективността се изчислява по следния очевиден израз:

$$\eta = \frac{Z_c}{Z_f}.$$
(2.19)

На фиг. 2.39, 2.40 и 2.41 са показани траекториите на частиците, оцветени в зависимост от средната скорост на газа m/s, за $d_p = 0.0005$, 0.005, 0.01 mm, като са получени стойности за ефективността съответно 0.375, 0.84 и 1. Изводът, който може да се направи, е че с увеличаване на диаметъра на частицата, ефективността на пневмоциклона нараства.





Particle Traces Colored by Velocity Magnitude (m/s)

Фиг. 2.39. $\eta = 0.375$ при $d_p = 0.0005$ mm

Particle Traces Colored by Velocity Magnitude (m/s)

Фиг. 2.40.
$$\eta = 0.84$$
 при $d_p = 0.005$ mm



Particle Traces Colored by Velocity Magnitude (m/s)

Фиг. 2.41. $\eta = 1$ при $d_p = 0.01$ mm

2.6.5. Моделиране на ефективността на пневмоциклона чрез ИНМ

За апроксимация на резултатите относно ефективността от ANSYS FLUENT се използват изкуствени невронни мрежи (ИНМ). Примерите необходими за построяване на ИНМ са получени чрез CFD моделиране по изложения по-горе метод т. 2.6.4. За скоростта на газа се задават стойности $U_g = 10$; 15; 20; 25; 30; 35; 40 m/s и за всяка от тях се изчислява полето на непрекъснатата фаза. При дадена скорост U_g се определят траекториите на



частиците, като ce изменя плътността ρ_{p} при стойности 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 kg/m³, а диаметърът на частиците при фиксирана плътност се задава последователно 1, 2, 3, 4..... µm до достигане на ефективност $\eta =$ 1. Получени са 430 примера, като 310 от тях се използват 3a обучение, 60 за верификация и спиране на обучението и 60 за изпробване на мрежата.

Фиг. 2.43. Архитектурата на невронната мрежа е многослоен перцептрон 3:3:2:1. Обучаващия алгоритъм, който е използван, е с обратно разпространение на грешката. На фиг. 2.43 са показани получените със CFD η_{CFD} и предсказаните с невронната мрежа стойности на ефективността на всичките 60 тестови примера η_{ANN} .

Основния недостатък на ИНМ е, че те изискват значителен брой примери. В това отношение се установява дали не може да се намали техния брой, без съществено влияние върху точността. За целта изходния брой примери е силно редуциран, като за скоростта на газа се задават стойностите $U_a = 10,25,40$ m/s и на плътността $\rho_o = 800,1400,2000$ kg/m³.

Получават се 80 примера разделени на три части - 50 за обучение, 15 за верификация и спиране на обучението и 15 за изпробване на мрежата. Избира се ИНМ по схемата 3:12:1 с един скрит слой и 12 неврона в него. Грешката при тестовите примери е до 4%. Мрежата е тествана и с 60-те примера заделени за проверка от пълното множество, за да се установи дали може да предсказва достатъчно точно при съчетания от режимни параметри, които не са били използвани за обучение. Ефективността изчислена от новата мрежа основана на редуцирания брой примери $\eta_{ANN-red}$ е показана на фиг. 2.43.

Основните изводи, които могат да се направят от получените резултати на фиг. 2.43 са:

1.Максималната разлика по схема 3:3:2:1 между получените чрез CFD и предсказаните с невронна мрежа стойности на ефективността е 5%, като в 90% от случаите грешката е под 4%, а в 75% е под 3%.

2.Максималната грешка по схема 3:12:1 е 6%, а в 90% от случаите е под 5%, следователно броят на необходимите примери може да се намали многократно, в случая 5 пъти, без значително увеличаване на грешката.

ГЛАВА 3. ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ НА СИСТЕМИТЕ ЗА ПНЕВМОТРАНСПОРТ

3.1. Общи бележки и постановка

При проектирането на всяка една система за пневмотранспорт в суспендирано състояние могат да бъдат дадени следните възможни комбинации от входни величини:

A \rightarrow дадени са основните характеристики на твърдата фаза: плътност ρ_p , диаметър d_p и степен на сферичност на частиците Γ ;

 $B \to$ известни са основните данни относно местоположението и геометрията на транспортиращата линия: началната S(x, y, z), крайната точка на транспортиране E(x, y, z) на частиците и геометрията на трасето G_i на системата;

 $C \rightarrow$ дадени са само началната S(x, y, z) и крайната точка на транспортиране E(x, y, z) на материала;

 $D \rightarrow$ известен е масовия дебит на твърдата фаза q_{p} ;

 $E \to$ дадена е общата маса на насипния материал M_p , който трябва да се транспортира.

Възможни са следните комбинации от входни величини, определящи вида на пневмотранспорта:

• *непрекъснат пневмотранспорт* в суспендирано състояние, при който се транспортира твърдата фаза непрекъснато в денонощието:

$$\boxed{A} + \boxed{B} + \boxed{D}, \tag{3.1}$$

или

A + C + D;

(3.2)

• пневмотранспорт в суспендирано състояние за дискретни (фиксирани) количества, при който се транспортира материала за различни интервали от време:

$$\boxed{A} + \boxed{B} + \boxed{E}, \tag{3.3}$$

ИЛИ

$$\boxed{A} + \boxed{C} + \boxed{E}. \tag{3.4}$$

При проектирането на системите за пневмотранспорт за всяка една комбинация входни величини се търсят следните общи изходни величини :

диаметър на тръбопровода D, масов дебит на газовата фаза q_g (скорост на газа U_a) и загуби на налягане p.

За всеки един конкретен вид пневмотранспорт в зависимост от дадената комбинация входни данни съществуват и различни комбинации от изходни величини, които освен общите включват още геометрия на трасето G_i и масов дебит на твърдата фаза q_n , както са показани в табл. 3.1

Вид пневмотранспорт	Комб	Изходни величини	
	A+B+D	$\rho_p; d_p; \Gamma; S(x, y, z); E(x, y, z); G_i; q_p$	D,q _g ,p
Непрекъснат	<i>A</i> + <i>C</i> + <i>D</i>	$\rho_p; d_p; \Gamma; S(x, y, z); E(x, y, z); q_p$	D,G_i,q_g,p
	A+B+E	$\rho_p; d_p; \Gamma; S(x, y, z); E(x, y, z); G_i; M_p$	D,q_g,p,q_p
За фиксирани	A+C+E	$\rho_{p}; d_{p}; \Gamma; S(x, y, z); E(x, y, z); M_{p}$	D,G_i,q_g,p,q_p
количества			

3.2. Формулиране на критерии за енергийна ефективност

Уравнението за консумираната мощност от работната машина (1.13) може да бъде записано по следния начин:

$$P = \frac{P_u}{\eta_{gm}\eta_{em}} = \frac{pQ_g}{\eta_{gm}\eta_{em}}.$$
(3.5)

Коефициентите на полезно действие η_{gm} и η_{em} представляват константи от което следва, че енергийната ефективност се определя от полезната мощност P_{u} необходима за преодоляване на загубите на налягане:

$$P_{\mu} = \rho Q_{a}, \tag{3.6}$$

Очевидно основен критерий за проектирането на енергийно ефективни системи за непрекъснат транспорт е изпълняването на условието да се постигне минимално възможна стойност на полезната мощност $P_{\mu} \rightarrow \min$.

В този ред на мисли, при пневмотранспорта за определени фиксирани количества от значение ще бъде не само минималната стойност на полезната мощност, но и времето *t* за което ще се транспортира материала. Следователно основния критерий за проектирането на енергийно ефективни системи при пневмотранспорт за дискретни количества е осигуряването на минимална стойност на консумираната енергия E_u → min.

$$E_{u} = P_{u}.t. \tag{3.7}$$

Необходимо е да се извърши един качествен анализ за влиянието на основната съставляваща на разхода на газа върху полезната мощност P_u . Дебитът Q_g е правопропорционален на скоростта U_g , а загубите на налягане намаляват с намаляване на скоростта. Следователно *с понижаването на скоростта на газа намалява мощността, т. е. повишава се енергийната ефективност.*

3.3.Числено и експериментално определяне на критичната скорост

При пневмотранспорт на едри частици в хоризонтален тръбопровод основно влияние върху разпределението на твърдата фаза по височина на тръбата оказват силите на теглото. Това е причина концентрацията на частиците да е неравномерна, като повечето от тях се групират в долната половина. За да се осигури успешен процес на транспортиране в суспендирано състояние е необходимо да се реализира достатъчно равномерно разпределение на частиците по цялото напречно сечение на тръбата чрез правилно определена скорост на транспортиращия газ. Следователно критичната скорост в хоризонтален тръбопровод е тази скорост на газовата фаза, при която частиците ще се движат в суспендирано състояние, без да се утаяват и натрупват по дъното на тръбопровода.

Основните етапи на това изследване са:

1.CFD моделиране на двуфазното течение газ-частици в хоризонтален тръбопровод и определяне на разпределението на частиците по височина при различни скорости на газа и разходи на твърдата фаза.

2. Експериментално определяне на разпределението на твърдата фаза и валидиране на числените резултати.

3.Опитно определяне на критичната скорост и съпоставянето й с разпределението на частиците при същите условия. На тази основа установяване на количествен критерий за числено определяне на критичната скорост.

Численото моделиране и експериментите са направени за различни стойности на масовият дебит q_p на твърдата фаза и на скоростта U_g на газа. Сечението в което се определя числено разпределението на частиците по височина е на разстояние 2000 mm от входа на тръбата, където осреднените параметрите на течението практически са достигнали установени стойности. За разпределение на частиците по височина се приема разпределението по височина на пресечните точки на изчислените 250 траектории с разглежданото сечение. Положението на точките по височина се задава от разстоянието им *y* до оста на тръбата. Отрицателните стойности на *y* се отнасят за точките под оста.



Експерименталното определяне на разпределението ce извършва В прозрачен хоризонтален участък OT тръбопровода на опитната уредба, отдалечен достатъчно преди и след смущаващи течението въздействия. С цифрова фотокамера се правят няколко последователни снимки при фиксирани масов дебит q₀ на твърдата фаза и скорост газа. Получените U_{a} на обработват изображения, ce със специализиран софтуер, като ce измерват разстоянията на частиците от центъра им до оста на тръбата в

участък с дължина 200 mm. Приема се,

че разпределението на частиците по височина в наблюдавания участък е еквивалентно на разпределението по височина на пресечните точки на техните траектории с напречно сечение на тръбата, разположено в границите на участъка. За да бъде коректно сравнението на числените и експерименталните резултати е необходимо броят на заснетите частици да се доближава до броя на изчислените траектории (250 на брой).

Кривите на разпределение илюстрират нагледно изменението на разпределението при промяна на скоростта на газа, като при масов разход $q_p = 0.060 \text{ kg/s}$ и скорост на газа $U_g = 15 \text{ m/s}$, 82% от частиците са под оста на тръбата (*y*=0) и само 18% преминават в горната половина. При значително по-голямата скорост $U_g = 26 \text{ m/s}$, над оста преминават вече 42% от частиците фиг 3.5.

На фиг. 3.5 с прекъснати линии са нанесени кривите на разпределение, определени за експериментално получените критични скорости. Вижда се, че те са сходни в количествено и качествено отношение, което дава основание да се потърси нещо което ги обединява.

Предлага се следния обобщен метод, който служи за определянето на критичната скорост при пневмотранспорт в суспендирано състояние:

1. Посредством CFD се моделира двуфазното течение в хоризонтален тръбопровод по метода на Лагранж. Задават се характеристиките на твърдата фаза – масов разход, плътност, еквивалентен диаметър и степен на сферичност. Частиците се въвеждат равномерно, по цялата височина на входното сечение.

2. Изчисляват се голям брой траектории и се определят пресечните им точки с едно напречно сечение на тръбата. Построява се кумулативната крива на разпределение на точките по височина.

3. Симулациите се правят за няколко стойности на скоростта на газа. Скоростта на газа, при която само 30% от траекториите на частиците пресичат контролното сечение над оста на тръбата, се приема за критична.

Критичната скорост е достигната, когато само 30% от частиците успяват да премината в горната половина на тръбопровода.

3.4.Енергийна ефективност при непрекъснат пневмотранспорт

• Пневмотранспорт в хоризонтален тръбопровод

При този случай на пневмотранспорт като пример са дадени: масов дебит на твърдата фаза $q_p = 3.8$ kg/s и характеристиките на частиците - плътност $\rho_p = 876$ kg/m³, диаметър $d_p = 3.6$ mm, коефициент на формата на частицата $\Gamma = 0.77$. Няма определено изискване относно компановката на транспортиращата линия и поради това се моделира хоризонтален пневмотранспорт с дължина отговаряща на типичен производствен процес – 40 m. Основната цел е да се определят диаметъра на транспортиращия тръбопровод и скоростта на газовата фаза, при които ще се осъществи найниска консумация на енергия. За определянето на минималната скорост на газовата фаза се използва обобщения метод за критичната скорост описан в т. 3.3.5. С помощта на ANSYS Fluent се определя U_{gcr} за всеки един от диаметрите на тръбопровода D = 0.154; 0.180; 0.204; 0.254; 0.304 m.

Изчислителната мрежа е неструктурирана, съставена от 1 322 379 елемента. Гъстотата на мрежата е уточнена след няколко последователни симулации с увеличаващ се брой елементи, до постигане на независимост на



решението.

Получените резултати са показани в табл. 3.3. Както се забелязва, С намаляването на диаметъра на тръбопровода ce понижава И стойността на критичната скорост до определена стойност на D=0.204 m. С намаляването на диаметъра на тръбопровода респективно намалява и разхода на газа Q_a, в резултат на което се понижава хидравличната P,,. мощност Същевременно ce наблюдава и повишаване на загубите на налягане при по-ниските

стойности на D, откъдето се повишава и мощността P_u . Ефектът се засилва и от това, че с намаляване на диаметъра на тръбата се увеличава броя на ударите на частиците в стените при преминаването им от входа до изхода на тръбопровода. При всеки удар частиците губят част от кинетичната си енергия, която след удара се възстановява за сметка на енергията на флуида.

Двупосочното влияние на диаметъра на тръбопровода D върху полезната мощност Р_и указва, че съществува оптимална стойност на диаметъра

D_{орt}, при която мощността е най-малка.

На следващата фигура 3.7 е показано влиянието на стойността на диаметъра D върху P_u . Резултатите показват, че най-ниската стойност на полезната мощност $P_u = 1980$ W се получава при диаметър на тръбопровода $D_{opt} = 0.204$ m при критична скорост на газа $U_{acr} = 17$ m/s.

<i>D</i> , m	0.304	0.254	0.204	0.180	0.154
U _{gcr} , m/s	23	18	17	18	19
$Q_g, m^3/s$	1.6	0.9	0.5	0.4	0.3
<i>p</i> , Pa	2014	2266	3566	5074	6930
<i>P</i> _{<i>u</i>} , W	3360	2065	1980	2283	2451

Табл.	3.3)
-------	-----	---

• Пневмотранспорт с хоризонтални, вертикални и наклонени участъци

Разглежда се реализирането на пневмотранспорт при зададени начална и крайна точка на системата, q_p и характеристики на частиците. Необходимо е да се определи освен D_{opt} и U_{gcr} и геометрията на транспортиращата линия G_i , при което ще се постигне най-ниска стойност на полезната мощност $P_u \rightarrow \min$. Геометрията на три различни решения относно транспортиращата линия е дадена на фиг. 3.8. Типа на използваните изчислителни мрежи е неструктуриран, като броя на елементите е : 1 568 349 за схема 1, 1 007 777 за схема 2 и 1 399 049 за схема 3. Частиците се инжектират по цялото входно сечение на тръбопровода със скорост 0 m/s.



Фиг. 3.8.

За всеки един тип на проектиране на транспортиращата линия 1, 2 и 3 е определен оптимален диаметър $D_{opt} = 0.204$ m и критична скорост на газа 17 m/s, при които $P_u \rightarrow min$, както се вижда от фиг. 3.9. Също така ясно е изразен и вида на транспортиращата линия, при която консумираната енергия ще бъде най-ниска, а именно това е решение 2 с наклонен тръбопровод. Това се дължи на факта, че тук загубите на налягане са най-ниски - 2532 Pa, докато при решение 1 и 3 са 3832 Pa и 4310 Pa.

• Обобщен метод за проектиране на енергийно ефективен непрекъснат пневмотранспорт

Въвежда се следния обобщен метод:

1. Моделира се двуфазното течение газ-частици в хоризонтален тръбопровод или в различните конфигурации на транспортиращата линия чрез средствата на CFD и метода на Ойлер-Лагранж. Въвеждат се основните параметри и характеристики на газовата и твърдата фаза в ANSYS Fluent.

2. За всеки един стандартен диаметър на тръбопровода D, за различните конфигурации на трасето, се определя критичната скорост на газа U_{gcr} . Определя се обемния дебит на газа Q_g , загубите на налягане p и полезната мощност P_u за всеки един конкретен случай.

3. Определя се оптималната стойност на диаметъра D_{opt} със съответната критична скорост на газа U_{gcr} , както и ако е необходимо и геометрията на транспортиращата линия G_i , при които полезната мощност има най-ниска стойност $P_{\mu} \rightarrow \min (3.6)$.

3.5.Енергийна ефективност при непрекъснат пневмотранспорт

• Числено моделиране на пневмотранспорт за фиксирани количества

Численото моделиране се осъществява като се разглежда конкретен пример на пневмотранспорт за пренасяне на материал с обща маса $M_p = 27\ 360\ \text{kg}$. Твърдата фаза е полипропилен с плътност $\rho_p = 876\ \text{kg/m}^3$; диаметъра $d_p = 3.6\ \text{mm}$ и коефициент на формата на частицата $\Gamma = 0.77$.

Разглежда се единствено случая при известна геометрия, начална и крайна точка на системата. За целта се моделира хоризонтален участък с дължина 40 m, което отговаря на изискването да съответства на действително използван пневмотранспорт в индустрията.

Използва се неструктурирана мрежа със значително сгъстяване до стената на тръбопровода, съставена от 1 322 379 елемента. Численото моделиране се извършва за различни стойности на масовия дебит на частиците $q_p = 1.26$; 1.9; 3.8; 7.6; 10.13 kg/s. За всяка една стойност на q_p се реализират компютърни симулации с различни стойности на диаметъра на тръбопровода D = 0.154; 0.180; 0.204; 0.304 m.



Определя ce оптималната стойност диаметъра на на тръбопровода *D*_{орt} за всеки един масов дебит на частиците q_p , който отговаря на условието за постигане стойност на минимална на консумираната енергия $E \rightarrow \min$. За всички масови разходи на твърдата фаза оптималната стойност на диаметъра на тръбопровода е една и съща $D_{opt} = 0.204 \text{ m}$.

Известно е, че с увеличаване на масовия дебит на частиците нарастват и загубите на налягане, в

резултат на което стойността на полезната мощност се увеличава. Също така с нарастване на q_p , поради намаляване на необходимото време на транспортиране t, се намалява консумираната енергия. Следователно двупосочното влияние на q_p показва, че съществува оптимална стойност на масовия дебит на частиците q_p^{*} , при която ще имаме най-ниска стойност на консумираната енергия. Получените резултати при оптимален диаметър на тръбопровода $D_{opt} = 0.204$ m за различни масови дебити са дадени в табл. 3.4. Както се вижда, полезната мощност P_u нараства с увеличаването на q_p поради високите стойности на загубите на налягане p и критичната скорост U_{gcr} . Но също така резултатите показват, че консумираната енергия има минимална стойност E = 3604 Wh при оптимален режим на транспортиране $q_p^* = 1.9$ kg/s, както се вижда от фиг. 3.11

Табл.	3.4.
-------	------

t,s	21600	14400	7200	3600	2700
q_p , kg/s	1.26	1.9	3.8	7.6	10.13
<i>U_{gcr}</i> , m∕s	16	15	17	19	21
<i>∆p</i> , Pa	1459	1839	3566	7171	10100
<i>P</i> _{<i>u</i>} , W	763	901	1980	4451	6934
<i>E</i> , Wh	4576	3604	3960	4451	5201

• Обобщен метод за проектиране на енергийно ефективен пневмотранспорт за фиксирани количества.

1. Моделира се геометрията на съответната система за прекъснат пневмотранспорт и двуфазното течение чрез средствата на ANSYS Fluent. Използва се метода на Ойлер-Лагранж за моделирането на присъствието на твърдата фаза, известен още като Discrete Phase Model (DPM). Въвеждат се основните характеристики на газа и твърдата фаза.

2. За всеки един масов дебит на твърдата фаза q_{ρ} се извършват компютърни симулации с различни стандартни стойности на диаметъра на тръбопровода *D*. За всеки един диаметър на тръбопровода се определя критичната скорост на газа U_{qcr} и загубите на налягане ρ .

3. Определя се оптималната стойност на диаметъра на тръбопровода D_{opt} , при който стойността на консумираната енергия (3.7) е най-ниска $E \rightarrow \min$, за всеки един масов дебит на частиците q_p преминаващ през системата.

4. Сравняват се всички режими на осъществяване на пневмотранспорт за фиксирани количества и се избира този с оптимален масов дебит на частиците q_{ρ}^{i} отговарящ на най-ниската стойност на консумираната енергия с определен оптимален диаметър D_{opt} и скорост на газа

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно-приложни приноси

1. Разработен е метод за определяне на средната скорост на частици в тръба, който се реализира чрез фотографиране с импулсна и постоянна светлина.

2. Установен е критерий за определяне на критичната скорост на газа в системите за пневмотранспорт в суспендирано състояние и е разработен метод за определянето й.

3. Формулирани са критерии и се предлагат обобщени методи за проектирането на енергийно ефективни системи за пневмотранспорт в суспендирано състояние.

Приложни приноси

1. Проведен е експеримент за определяне на коефициента на формата чрез фотографиране в смес от етанол-вода, който отговаря на изискването за произволна ориентация на частиците.

2. Приложен е способ за моделирането на ефективността на пневмоциклон чрез средствата на CFD и изкуствени невронни мрежи.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

[1] Дуков, И., Д. Танева. Приложение на изкуствени невронни мрежи за моделиране на ефективността на пневмоциклон, , Сборник доклади 20 Научна конференция с международно участие ЕМФ 2015, том II, стр.113-119 [2] Дуков, И., Д. Танева. Числено (CFD) моделиране на загубите на налягане в пневмоциклон и валидиране, Сборник доклади 20 Научна конференция с международно участие ЕМФ 2015, том II, стр. 120-125

[3] Dukov I., D. Taneva. Determination of the particle shape factor using Cauchy's theorem and image analysis. Proceedings of XXI Scientific conference FPEPM 2016, Vol. II. Sozopol, 2016, page 60-63

[4] Dukov I., D. Taneva. Application of CFD for design of energy efficient dilute phase pneumatic conveying systems. Thermal engineering, ISSN 1314-2550, year 8, 2017.

[5] Dukov I., D. Taneva. Numerical and experimental determination of the minimum gas velocity for dilute phase pneumatic conveying. Journal of Thermotechnics, ISSN 1314-2550, year 7, 2016.

[6] Dukov I., D. Taneva. Application of CFD for energy efficient design of batch (discrete) dilute phase pneumatic conveying systems,Proceedings of XXII Scientific conference FPEPM 2017, Vol. II. Sozopol, 2017, page 58-61

[7] 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

[8] Taneva, D. Numerical and experimental determination of the pressure drop in dilute phase pneumatic conveying. Proceedings of XXI Scientific conference FPEPM 2016, Vol. II. Sozopol, 2016, page 64-68

SUMMARY

The title of dissertation thesis is Research for improvement of energy efficiency of pneumatic conveying in suspended condition. The main aim is to establish energy efficiency criteria for pneumatic conveying in suspended condition and to develop methods for its improvement by optimall selecting of the basic geometric and aerodynamic parameters of the systems.