

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Пневматичний трубопровідний транспорт твердих дисперсних матеріалів широко застосовується в багатьох галузях промисловості, що пов'язані з виробництвом, переробкою та зберіганням різного роду сипких вантажів. Пневмотранспортні системи (ПТС) прості за своєю конструкцією, компактні, захищають вантажі від атмосферних впливів, а докільця – від запилення. Однак подальше розширення сфери використання пневмотранспорту часто стримується відсутністю науково обґрунтованих надійних інженерних методів аеродинамічного (гідравлічного) розрахунку ПТС, а також обмеженим обсягом і номенклатурою живильників ПТС, що випускаються промисловістю, у тому числі таких, які відповідають сучасним вимогам.

Недосконалість теорії пневмотранспорту та відсутність достатньо обґрунтованих фізичних моделей руху сумішей повітря й твердих дисперсних матеріалів (аеросумішей) по трубах призвело до того, що в практиці проектування та створення ПТС використовується безліч різних і в більшості своїй емпіричних розрахункових формул. Загальним недоліком їх є обмеженість умовами експерименту, на основі яких вони одержані, а інколи й недопустимо низький ступінь точності, через що виникають певні труднощі у виборі розрахункових формул для даного об'єкта проектування.

Слід зазначити також, що певним недоліком роботи ПТС є підвищена витрата енергії на транспортування. За даними зарубіжних джерел питома витрата енергії на одиницю маси транспортованого матеріалу складає 3–5 кВт год/т·км, що в 3–6 разів перевищує відповідні витрати при механічному транспортуванні. При цьому живильник і транспортний трубопровід приблизно порівну витрачають енергію.

Із сказаного вище виходить, що розробка науково обґрунтованої узагальненої методики гідравлічного розрахунку ПТС, придатної для практичного використання в широкому діапазоні зміни умов пневмотранспортування, та пошук і реалізація резервів енергозбереження в живильниках і трубопроводах промислових ПТС є актуальною науково-технічною проблемою, вирішення якої має велике народно-господарське значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на підставі наукових досліджень, проведених в Автомобільно-дорожньому інституті ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (АДІ ДВНЗ «ДонНТУ») у рамках наступних держбюджетних тем під керівництвом дисертанта: «Розробка аналітико-експериментальних методів розрахунку камерних і ежекторних живильників пневмотранспортних систем», інв. № 0200U003339, 1999 р.; «Дослідити параметри пневмотранспортних потоків підвищеної і середньої концентрації», інв. № 0203U002243, 2002 р.; «Аналітичні та експериментальні дослідження аеродисперсних потоків», інв. № 0206U002898, 2005 р.; «Удосконалення методів розрахунку та проектування пневмотранспортних систем промислового призначення», інв. № 0209U002575, 2008 р., «Розробка та впровадження нових машин і технологій на базі виконаних досліджень пневмотранспортних потоків», інв. № 0210U007918, 2010 р.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розвиток теоретичних основ аеродинамічного (гідравлічного) розрахунку пневмотранспортних систем і створення малогабаритних камерних живильників, які забезпечували б зниження енерговитрат на транспортування сипких матеріалів по трубах потоками повітря.

Для досягнення мети сформульовано такі науково-практичні завдання:

1. Для сталого потоку аеросуміші скласти рівняння нерозривності, енергобалансу, яке, як і в гідро-та і в аеромеханіці, прийнято називати рівнянням Бернуллі, та гідравлічних опорів і отримати на їх основі й експериментальних даних науково обгрунтовану узагальнену методику визначення питомого, на одиницю довжини труби, перепаду тиску.

2. Розробити методику розрахунку критичного режиму пневмотранспортування по прямих горизонтальних трубах, який є межею між режимами стабільного (без замулення труби) і нестабільного (з частковим замуленням труби) пневмотранспортування, та визначення відповідної критичної швидкості потоку аеросуміші.

3. Встановити функціональний зв'язок критичної швидкості вертикального висхідного потоку аеросуміші з аналогічною швидкістю в горизонтальній трубі при одних і тих же умовах пневмотранспортування та визначити на його основі критичну швидкість вертикального висхідного потоку повітря.

4. Дослідити основні закономірності руху аеросуміші у вигинах трубопроводу і розробити метод розрахунку втрат тиску для подібних місцевих гідравлічних опорів.

5. Розробити узагальнену методику гідравлічного розрахунку пневмотранспортного трубопроводу придатну для практичного використання в широкому діапазоні зміни умов пневмотранспортування.

6. Виконати експериментальні дослідження основних параметрів пневмотранспорту – питомого перепаду тиску і критичної швидкості на прямих горизонтальних ділянках трубопроводу, та зіставити експериментальні данні з розрахунковими значеннями вищезазначених основних параметрів.

7. Розробити науково обгрунтовані принципи розрахунку та проектування високопродуктивних енергоефективних малогабаритних камерних живильників ПТС, які забезпечують подачу сипкого матеріалу на великі відстані. Здійснити випробування дослідних зразків конструкцій малогабаритних живильників, та їх промислове впровадження.

Об'єкт дослідження – процес транспортування аеродисперсних сумішей в трубопроводах і живильниках пневмотранспортних систем.

Предмет дослідження – інтегральні параметри аеродисперсних потоків у трубопроводах і живильниках пневмотранспортних систем.

Методи дослідження. Поставлені задачі вирішувалися теоретичними методами, що базуються на фундаментальних положеннях теорії гідро- та аеромеханіки двофазних потоків, сучасному математичному інструментарії.

Планування експериментів та математична обробка результатів вимірів проводилися відповідно до стандартних процедур за ГОСТами 8.207-76, 11.004-74, 11.006-74. Результати експериментів використані для перевірки точності розрахунків за розробленими методиками аеродинамічного розрахунку та

адекватності математичних моделей трубопровідного пневмотранспорту тонкодисперсних вантажів.

Експериментальні дослідження проводилися на дослідному стенді АДІ ДВНЗ «Дон НТУ», а також на промислових підприємствах енергетичної та будівельної галузей України.

Наукова новизна отриманих результатів. Для сталого потоку аеросуміші, як стиснутого середовища, вперше запропоновано науково обґрунтовані основи та методи розрахунку інтегральних параметрів пневмотранспортування, що базуються на аеродинамічних рівняннях нерозривності, енергетичного балансу (аналог відомого рівняння Бернуллі), гідравлічних опорів, а також на рівнянні стану газу. Науковою новизною дисертації є:

1. Складено узагальнене рівняння Бернуллі для неізотермічного, у загальному випадку, потоку математично точним і фізично обґрунтованим методом. Отримано нові вирази для швидкісного та температурного напорів.

2. Розроблено нові узагальнені науково обґрунтовані методи розрахунку інтегральних параметрів ізотермічного, рівномірного руху аеросумішей горизонтальними та вертикальними ділянками труби у випадку малих відносних перепадів тиску на кінцях труби, коли стисливістю повітря можна знехтувати і вважати, що його густина є незмінною по усій довжині труби. При порівняно великих відносних перепадах тиску враховується характер зміни густини повітря в залежності від тиску.

3. Вперше складено рівняння визначення критичної швидкості пневмотранспортування на базі критерію рівності осередненого дотичного напруження аеросуміші на нижній стінці труби та інтенсивності сили тертя ковзання твердого матеріалу по тій же стінці, що визначає критичний режим пневмотранспортування по прямих горизонтальних трубах і відповідає мінімальному значенню питомого перепаду тиску при заданій концентрації аеросуміші.

4. Встановлено, що коефіцієнт гідравлічного тертя при пневмотранспортуванні пилоподібних часток є меншим від аналогічного коефіцієнта тертя у відповідному потоці повітря, що є непрямим підтвердженням відомого ефекту послаблення інтенсивності турбулентності в запилених потоках повітря.

5. Вперше побудовано фізичну модель двофазного потоку у вигині трубопроводу, засновану на припущенні про повний поділ фаз під дією відцентрових сил, що визначає зниження швидкості твердого матеріалу в коліні, його наступний розгін за поворотом і відповідні втрати енергії.

6. Запропоновано метод зниження енерговитрат на вивантаження дрібнодисперсного матеріалу з камери живильника в транспортний трубопровід, що забезпечується обмеженням висоти шару цього матеріалу.

7. Дістав подальшого розвитку метод аналізу розподілу сил по висоті камери живильника циліндроконічної форми.

8. Вперше розроблено метод визначення розвантажувальних характеристик малогабаритного камерного живильника.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблені методики аеродинамічного розрахунку трубопровідних систем пневматичного транспорту характеризуються цілком задовільною точністю та придатні для практичного використання у широкому діапазоні зміни умов пневмотранспортування.

2. Розроблено алгоритм і програму аеродинамічного розрахунку та чисельного аналізу пневматичного транспорту сипких матеріалів.

3. Розроблено методики аеродинамічного розрахунку та проектування малогабаритних камерних живильників пневмотранспортних систем.

4. Вищезазначені методики розрахунку впроваджені в практику проектування пневмотранспортних систем проектними організаціями України.

5. Розроблено дослідні зразки малогабаритних камерних живильників, які пройшли промислово перевірку на теплових електростанціях та підприємствах будівельної індустрії:

- на Слов'янській ТЕС у лінії подачі вугільного пилу з пилоприготувального цеху на енергоблок впроваджено малогабаритний камерний насос НК 5 (продуктивність – 60 т/год, ємність камери – 1,25 м³);

- на Семипалатинській ТЕС (Казахстан) у лінії видалення золи впроваджено камерний насос НК 3 (продуктивність – 12 т/год, ємність камери – 0,3 м³);

- на Алуштинському ЖБК у лінії подачі цементу з силосів у бетоноприготувальному цеху впроваджено камерний насос НК 1 (продуктивність – 15 т/год, ємність камери – 0,3 м³).

6. Промислова апробація зразків конструкцій малогабаритних камерних живильників підтвердила високу ефективність розроблених методик аеродинамічного розрахунку та проектування пневмотранспортного обладнання. На Слов'янській ТЕС прийнято рішення про заміну десяти пневмогвинтових насосів на малогабаритні камерні живильники конструкції АДІ ДВНЗ «ДонНТУ».

7. Реалізація результатів дисертаційної роботи дозволила отримати реальний річний економічний ефект на один МЖК – 400000 грн. Очікуваний річний економічний ефект на 10 МЖК становить 4 млн грн, що підтверджено актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно сформульовані мета і завдання досліджень, наукові положення, висновки та рекомендації, розроблена концепція роботи та її основні науково-технічні принципи. Як науковий керівник науково-дослідних робіт, виконаних у рамках бюджетної тематики, автор був організатором і безпосереднім учасником обґрунтування та вибору методів проведення лабораторних досліджень і промислових випробувань, розробки технічної та робочої документації на лабораторне обладнання, дослідно-промислові та промислові зразки малогабаритних камерних живильників, розробки апаратури й програмного забезпечення розрахунку та аналізу аеродисперсних потоків.

Зміст дисертації викладено автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися й були схвалені на: науково-технічній конференції «Стратегія управління соціально-економічним розвитком регіона на період до 2010 года (Донецкая область – 2010)» (м. Донецьк, 1999 р.); міжнародній науково-

технічній конференції «Проблеми створення нових машин і технологій» (м. Кременчук, 2000 р.); V міжнародній конференції «Еколого-економічні проблеми розвитку підприємств регіону» (м. Луганськ, 2000 р.); VI міжнародній конференції «Гидроаэромеханика в инженерной практике» (м. Харків – 2001 р., м. Київ – 2002 р., м. Черкаси – 2003р., м. Київ – 2004 р., м. Краматорськ – 2005 р., м. Київ – 2006 р., м. Луганськ – 2007 р.; міжнародній науково-технічній конференції «Горная электромеханика и автоматика» (м. Донецьк – 2001, 2002, 2003, 2004 рр.); науково-технічній конференції «Топливообеспечивающие системы тепловых электростанций (технологии, режимы работы и техническое переоснащение)» (м. Горлівка, 2001 р.); IX міжнародній науково-технічній конференції «Машиностроение и техносфера XXI века» (м. Севастополь, 2002 р.); науково-практичній конференції «Донбасс-2020: наука и техника – производству» (м. Донецьк – 2002, 2004, 2006, 2010 рр.); міжрегіональній науково-практичній конференції «Современные проекты, технологии и материалы для строительного, дорожного комплексов и жилищно-коммунального хозяйства» (РФ, м. Брянськ, 2002 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Современные научно-технические проблемы транспорта России» (РФ, м. Ульяновськ, 2002 р.); IV міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми економії енергії» (м. Львів, 2003 р.); IV науково-технічній конференції «Проблеми механіки гірнично-металургійного комплексу» (м. Дніпропетровськ, 2004 р.); XII міжнародній науково-практичній конференції «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье» (м. Харків, 2004 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Энергоэффективность – 2004» (м. Одеса, 2004 р.); міжнародній науково-технічній конференції та методичній конференції «Актуальні проблеми математики, механіки і комп'ютерних технологій» (м. Хмельницький, 2005 р.); міжнародній науково-технічній конференції АФ ПП «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Кіровоград – 2000 р., м. Львів – 2005 р.);

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано в 50 друкованих працях, з яких у спеціалізованих фахових виданнях, затверджених ВАК України – 28, у т.ч. без співавторів – 14; одержано 2 патенти України і 8 авторських свідоцтв.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, переліку використаних літературних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 307 сторінок, включаючи 244 сторінки основного тексту, 18 таблиць і 67 рисунка, перелік використаних літературних джерел з 219 найменувань на 23 сторінках і 63 сторінки додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та визначено основні завдання дослідження, описано об'єкт і методи дослідження, викладено наукову та практичну цінність одержаних результатів із зазначенням особистого внеску автора.

У першому розділі наведено аналіз сучасного стану проблем поліпшення техніко-економічних характеристик пневмотранспортних систем, визначено перспективні напрямки розвитку цієї роботи, в тому числі шляхом удосконалення ме-

тодів їх розрахунку і проектування.

Проведено аналітичний огляд літературних джерел за тематикою розробки науково обґрунтованих методів аеродинамічного розрахунку трубопроводів ПТС. Характеризуючи зміст публікацій, варто виділити роботи Ф.Г. Зуєва, Г.М. Островського, А.І. Волошина, Г.Ф. Костюка, С.І. Кріля, Р.Л. Зенкова, В.А. Шваба, Я. Урбана, W. Siegel, G.E. Klinzing, F. Marcus, F. Rizk, L.S. Leung, D. Mills, M. Bradley, C. Ratnayake та ін., в яких найбільш повно розглянуті питання закономірностей процесів пневмотранспортування, представлені результати та висновки експериментальних досліджень, математичні моделі та ін.

На основі аналізу опублікованих робіт та за більш ніж сорокорічний період розробок й удосконалення методів аеродинамічного розрахунку трубопроводів ПТС виявлено, що, не дивлячись на велику кількість запропонованих розрахункових формул, більшість із них одержано емпіричним шляхом для конкретних дисперсних матеріалів і порівняно вузького діапазону зміни параметрів, що впливають на процес пневмотранспортування. Ці формули не завжди задовольняють сучасним вимогам проектування і створення пневмотранспортних систем.

Намічено можливі шляхи та задачі, що пов'язані з розробкою обґрунтованих методик аеродинамічного розрахунку ПТС. Один з них – використання досвіду розв'язання подібних проблем у спорідненій галузі – гідротранспорті сипких матеріалів, але з урахуванням особливостей аеродисперсного потоку. Це дає змогу створити наукову базу для розробки узагальнених методів аеродинамічного розрахунку пневмотранспортних трубопроводів та живильників.

Розглянуто та проаналізовано основні схеми та елементи конструкції діючих ПТС з точки зору підвищення їх енергетичної ефективності, сформульовано завдання досліджень. Показано необхідність і актуальність досліджень у галузі вдосконалення живильників ПТС.

У другому розділі викладено результати теоретичних досліджень, пов'язаних з визначенням питомого перепаду тиску і критичної швидкості при пневмотранспортуванні по прямих горизонтальних трубах.

В рамках механіки суцільного двофазного середовища побудовано узагальнене рівняння Бернуллі для неізотермічного сталого руху аеросуміші на випадок адіабатного процесу зміни стану газу. Це рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} (c_{pm} \frac{(1-c_p)}{(1-c)^2} \beta + c_{pm,T} \frac{c_p^2}{c^2} \beta_T) \frac{u_{cm}^2}{2g} + \frac{P}{\rho_p g} + \frac{c_{pm} RT}{(K-1)g} + z + h_n = \\ = \text{const (уздовж потоку)}. \end{aligned} \quad (1)$$

В (1) використано позначення: c_{pm} , $c_{pm,T}$ – витратна масова концентрація газу та твердого матеріалу; c_p , c – витратна та істинна об'ємні концентрації твердих часток; β , β_T – коефіцієнт Коріоліса для потоку газової і твердої фаз аеросуміші; u_{cm} – середня за витратою швидкість потоку аеросуміші; P – статичний тиск; ρ_p , T – витратна густина і температура (К) аеросуміші; R – універсальна газова стала; K – показник адіабати; z – відмітка центра мас аеросуміші від площини

порівняння; h_n – втрачений напір; g – прискорення сили тяжіння. Рівняння (1) ураховує, окрім швидкісного та п'єзометричного напорів, температурний напір

$$\frac{c_{pm}RT}{(K-1)g},$$

який фізично виражає теплову енергію одиниці ваги газової фази аеросуміші.

У разі низьконапірного ізотермічного руху аеросуміші при малих відносних перепадах тиску на кінцях труби, коли стисливістю газу можна нехтувати, рівняння (1) перетвориться до вигляду:

$$\rho_f \frac{u_{cm}^2}{2} + P + \rho_p gz + \Delta E_M = const \text{ (уздовж потоку);} \quad (2)$$

$$\rho_f = \left[\rho \frac{(1-c_p)^3}{(1-c)^2} + \rho_T \frac{c_p^3}{c^2} \right] \beta_{cp}; \quad (3)$$

$$\rho_p = \rho_T c_p + \rho(1-c_p); \quad (4)$$

$$\beta_{cp} = \frac{1}{2}(\beta + \beta_T); \quad (5)$$

$$\Delta E_M = \rho_p g h_n, \quad (6)$$

де ρ_f – ефективна густина аеросуміші;

ρ_p – витратна густина аеросуміші;

ρ, ρ_T – густина газу і твердих часток;

ΔE_M – втрата питомої (в одиницях об'єму) повної механічної енергії.

Рівняння (1) доповнюється гідравлічним рівнянням нерозривності:

$$\rho_p u_{cm} S = const, \quad (7)$$

де S – площа поперечного перерізу труби.

У поодинокому випадку рівномірного руху аеросумішей в трубах загальний вираз для втрати питомої потенційної енергії тиску на тертя має вигляд:

$$\Delta E_M = \lambda_{cm} \frac{L}{D} \rho_f \frac{u_{cm}^2}{2}, \quad (8)$$

де λ_{cm} – гідравлічний коефіцієнт тертя для потоку аеросуміші;

L, D – довжина і діаметр труби.

Тут важливо відзначити, що у виразі (8) ураховується питома кінетична енергія потоку, яка входить до рівняння Бернуллі (2) і виражається через ефективну густину аеросуміші (ρ_f). Саме в цьому полягає наукова новизна формули (8).

Рівняння (2), (7) і (8) є базовими для розробки науково обґрунтованих методів гідравлічного розрахунку основних параметрів пневмотранспортування. При розробці цих методів розрахунку виявлено, що, з огляду на характер впливу

твердої фази аеросуміші на величину питомого перепаду тиску і критичної швидкості потоку, сипкі матеріали, які перекачуються потоком повітря, доцільно умовно розділити на дві категорії: дрібнодисперсні та крупнодисперсні. До дрібнодисперсних відносяться подрібнені порошкові матеріали, середня крупність яких не перевищує 100 мкм, а число Рейнольдса $Re_T = \frac{d_T w}{\nu} \leq 6$.

Усі інші сипкі матеріали відносяться до крупнодисперсних.

Нижче наведено одержані розрахункові формули для визначення питомого перепаду тиску $\frac{\Delta P_{TP}}{L}$ і критичної швидкості пневмотранспортування $u_{кр}$ при рівномірному русі аеросуміші в прямих горизонтальних трубах.

Питомий перепад тиску:

а) для крупнодисперсних твердих матеріалів:

$$\frac{\Delta P_{TP}}{L} = \bar{\lambda}_f \bar{\rho}_f (1 + \mu_v)^2 \lambda \frac{\rho u^2}{2D} ; \quad (9)$$

$$\bar{\rho}_f = \frac{(1 - c_p)^3}{(1 - c)^2} + \Delta_T c_p \left(\frac{c_p}{c} \right)^2 ; \quad (10)$$

$$\bar{\lambda}_f = \bar{\lambda}_{f,кр} \left(1 - \bar{A} \cdot th \left[1,246 \left(1 - \frac{u_{кр}}{u} \right) \cdot \lg Re_T \right] \right) ; \quad (11)$$

$$\bar{\lambda}_{f,кр} = 1 + 0,667 \left(\lg \frac{Re_T}{6} \right)^{1,94} \cdot th(0,93 \mu_v^{0,8}) ; \quad (12)$$

$$\bar{A} = th \left[b (\bar{\lambda}_{f,кр} - 1)^{0,7074} \right] ; \quad (13)$$

$$b = 1,875 - 0,474 \lg Re_T ; \quad (14)$$

$$\bar{\lambda}_f = \frac{\lambda_{см} \cdot \beta_{ср}}{\lambda} ; \quad \bar{\rho}_f = \frac{\rho_f}{\rho} ; \quad \Delta_T = \frac{\rho_T}{\rho} ,$$

де $\frac{\Delta P_{TP}}{L}$ – питомі втрати тиску на ділянці трубопроводу довжиною L;

$\bar{\lambda}_f$, $\bar{\rho}_f$ – відносні значення коефіцієнта тертя та ефективної густини аеродисперсної суміші;

$u_{кр}$ – критична швидкість руху повітря в транспортному трубопроводі;

λ – гідравлічний коефіцієнт тертя у відповідному потоці чистого (без твердих часток) повітря;

u – середня швидкість повітря;

μ_v – співвідношення об'ємних витрат твердого матеріалу та повітря.

б) для дрібнодисперсних твердих матеріалів:

$$\frac{\Delta P_{TP}}{L} = \bar{\lambda} \bar{\rho} (1 + \mu_v)^2 \lambda \frac{\rho u^2}{2D}; \quad (15)$$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{кр} \left[1 + (0,43 + 0,19 \text{Re}_T) \left(1 - \frac{u_{кр}}{u} \right)^2 \right]; \quad (16)$$

$$\bar{\rho} = 1 + (\Delta_T - 1) \frac{\mu_v}{1 + \mu_v}; \quad (17)$$

$$\bar{\lambda}_{кр} = \left[1 - (1 - \varphi) \text{th} \left(47,16 \cdot \sqrt{\mu_{v,кр}} \right) \right] (1 + \mu_{v,кр})^{-2}; \quad (18)$$

$$\varphi = 0,127 + (1 + 1,016 \text{Re}_T) 0,22 \text{Re}_T; \quad (19)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_{см} \cdot \beta_{ср}}{\lambda}; \quad \bar{\rho} = \frac{\rho_{см}}{\rho}.$$

Залежності (11) і (16) носять емпіричний характер. Область їх застосування обмежена значеннями $0,0002 \leq \mu \leq 0,1$; $\text{Re}_T < 3000$; $u \geq u_{кр}$. При визначенні величини $\bar{\lambda}$ встановлено, що у разі пневмотранспортування дрібнодисперсних твердих матеріалів величина $\bar{\lambda} < 1$ при $\text{Re}_T < 6$. Тобто гідравлічний коефіцієнт тертя у запилених потоках повітря менший від аналогічного коефіцієнта тертя у відповідному потоці чистого повітря. Це може бути непрямим підтвердженням відомого ефекту погашення турбулентності в запилених газових потоках. У випадку пневмотранспортування крупнодисперсних твердих матеріалів при $\text{Re}_T \geq 6$, $d_T > 100$ мкм величина $\bar{\lambda}_f > 1$, тобто коефіцієнт $\lambda_{см} > \lambda$, що свідчить про підвищену турбулізацію потоку газу при наявності в ньому крупнодисперсних твердих часток. У граничному випадку, коли число Рейнольдса $\text{Re}_T \rightarrow 6$, значення відносних коефіцієнтів гідравлічного тертя $\bar{\lambda}$ і $\bar{\lambda}_f$ наближаються до одиниці.

Критична швидкість пневмотранспортування

Критична швидкість повітря, відповідна початку випадіння твердих часток в осад, це один з найважливіших параметрів пневмотранспортування. У разі менших швидкостей повітря відбувається частковий або повний завал трубопроводу і різко зростає перепад тиску. Тому з метою забезпечення надійності та ефективності пневмотранспорту необхідно розробити науково обґрунтований метод прогнозування критичної швидкості.

Раніше при дослідженні гідравлічного трубопровідного транспорту сипких матеріалів експериментально було встановлено, що при критичному режимі гідротранспортування твердий матеріал досить нерівномірно розподіляється по висоті горизонтального потоку і основна його маса переміщується у нижніх висококонцентрованих шарах потоку. В цих шарах в'язкі та турбулентні дотичні напруження суміші малі порівняно з напругою сил механічного тертя твердих часток одна об

одну та об стінку труби. Тому в критичному або близькому до нього режимах транспортування осереднені дотичні напруження в донних висококонцентрованих шарах потоку визначаються в основному згаданим механічним тертям. Аналогічне положення використано для аналізу критичних режимів аеродисперсних потоків.

Нехай $\bar{\tau}_n$ і $\bar{\tau}_m$ – середньостатистичне значення дотичного напруження на нижній стінці труби й напруга середньостатистичної сили тертя ковзання твердого матеріалу по дну труби. Єдиною умовою, що визначає критичний режим транспортування, є рівність:

$$\bar{\tau}_n = \bar{\tau}_m. \quad (20)$$

Вона виражає граничну динамічну рівновагу між потоком в цілому і суцільним потоком твердих часток, що пересуваються по нижній стінці труби. Области режимів стабільного (II) та нестабільного (I) пневмотранспортування і критичний режим, що розділяє ці області, наведено на рисунку 1. Тут же через I' та II'' позначено, відповідно, режими з повним і частковим випадінням твердого матеріалу в осад.

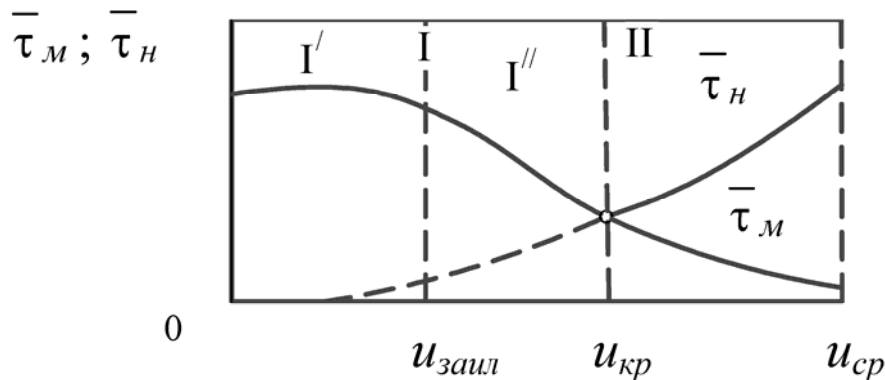


Рисунок 1 – Схема дотичних напружень на нижній стінці труби

Рівність (20) дає змогу одержати рівняння для критичного режиму пневмотранспортування. Для цього потрібно виразити величину $\bar{\tau}_n$ через питомий перепад тиску, а величину $\bar{\tau}_m$ через параметри, характерні для тертя ковзання:

$$\bar{\lambda}_{f,кр} \rho_{f,кр} (1 + \mu_{v,кр})^2 \lambda_{кр} \frac{\rho u_{кр}^2}{2D} = 0,313 \rho g (\Delta_T - 1) \mu_{v,кр}^{0,6} \cdot th \left[17,27 \left(\frac{\bar{d}_T}{\Delta^*} \right)^{0,85} \right], \quad (21)$$

де $\bar{d}_T = \frac{d_T}{D}$ – середній відносний діаметр твердих часток;

Δ^* – безрозмірний параметр густини твердих часток.

Нижче приведені алгебраїчні рівняння критичного режиму пневмотранспортування, окремо для крупнодисперсних і дрібнодисперсних матеріалів.

Рівняння критичного режиму:

а) для крупнодисперсного матеріалу:

$$\bar{\lambda}_{f.kp} = 1 + 0,667 \left(\lg \frac{\text{Re}_T}{6} \right)^{1,94} \cdot th(0,93\mu_v^{0,8}); \quad (12)$$

$$\bar{\rho}_{f.kp} = \frac{(1 - c_{p.kp})^3}{(1 - c_{kp})^2} + \Delta_T c_{p.kp} \left(\frac{c_{p.kp}}{c_{kp}} \right)^2; \quad (22)$$

$$c_{p.kp} = \frac{\mu_{v.kp}}{1 + \mu_{v.kp}}; \quad (23)$$

$$c_{kp} \left[1 - f_p \left(1 - \frac{c_{kp}}{c_{\max}} \right)^{2,16} \right] = c_{p.kp}, \quad (24)$$

де $c_{\max} = 0,6$;

$$f_p = 0,45 \left(1 + sign x_p \cdot th(0,967|x_p|^{0,6}) \right); \quad (25)$$

$$x_p = \lg \text{Re}_T - 0,88. \quad (26)$$

б) для дрібнодисперсних матеріалів:

$$\bar{\lambda}_{kp} \bar{\rho}_{kp} (1 + \mu_{v.kp})^2 \lambda_{kp} \frac{u_{kp}^2}{2gD} = (\Delta_T - 1) K_{kp}; \quad (27)$$

$$\bar{\lambda}_{kp} = \left[1 - (1 - \varphi) th(47,16 \cdot \sqrt{\mu_{v.kp}}) \right] (1 + \mu_{v.kp})^{-2}; \quad (28)$$

$$\varphi = 0,127 + (1 + 1,016 \text{Re}_T) 0,22 \text{Re}_T; \quad (29)$$

$$\bar{\rho}_{kp} = 1 + (\Delta_T - 1) \frac{\mu_{v.kp}}{1 + \mu_{v.kp}}; \quad (30)$$

$$\mu_{v.kp} = \frac{4\dot{m}_T}{\pi D^2 \rho_T u_{kp}}; \quad (31)$$

$$\lambda_{kp} = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}_{kp}} + \frac{K}{D} \right)^{0,25}; \quad (32)$$

$$K_{kp} = \beta_1 \mu_{v.kp} \text{ для } 0 \leq \mu_{v.kp} \leq 0,04; \quad (33)$$

$$K_{kp} = \beta_1 \cdot 0,04 + \beta_2 (\mu_{v.kp} - 0,04) \text{ для } 0,04 \leq \mu_{v.kp} \leq 0,1; \quad (34)$$

$$\text{Re}_{кр} = \frac{u_{кр} D}{\nu} . \quad (35)$$

Алгебраїчні рівняння (21) і (27) розв'язуються чисельним або графічним методом.

Отже, вище одержано розрахункові формули на випадок, коли аеросуміш можна розглядати як нестисливе середовище за умови, що $\frac{\Delta P}{P_1} \ll 1$, де ΔP – перепад тиску між початковим і кінцевим перерізами труби, а P_1 – тиск у початковому перерізі. Навіть при $\frac{\Delta P}{P_1} = 0,05$ нехтування стисливістю аеросуміші дає похибку у визначенні питомого перепаду тиску не більшу ніж 2,5%, що є цілком припустимим у більшості інженерних розрахунків. Достовірність методик розрахунку питомих втрат тиску і критичної швидкості пневмотранспортування, розроблених на випадок, коли стисливістю повітря можна нехтувати, обговорюється у п'ятому розділі дисертації.

Однак, у випадку довгого трубопроводу або високонапірного руху аеросуміші, коли перепад тиску немалий порівняно з P_1 , при аеродинамічному розрахунку цей трубопровід завжди можна розбити на окремі розрахункові ділянки, по довжині яких $\frac{\Delta P}{P_1} = 0,05$, і вважати, що густина повітря незмінна, але різна, в залежності від тиску, для різних ділянок трубопроводу. При цьому систему вихідних рівнянь (2), (7) і (8) потрібно доповнити рівнянням зміни стану газу.

Для автоматизації аеродинамічного розрахунку пневмотранспортних систем розроблено комп'ютерну програму.

До бази даних розрахункової програми закладено характеристики сипких матеріалів та типових схем трубопровідних систем. Нові додаткові схеми трубопроводів вводяться в програму автоматично за допомогою прийнятої системи кодів, визначаючих геометрію траси. Також автоматично здійснюється поділ траси на короткі розрахункові ділянки, густина потоку на яких під час транспортування може розглядатися незмінною.

Для вирішення конкретних завдань вводяться дані з назви матеріалу, геометрії траси, продуктивності ПТС. Приклад оформлення результатів розрахунку наведено на рисунку 2.

Використання програмного забезпечення дозволяє практично миттєво одержувати результати розрахунків, підвищує їх точність.

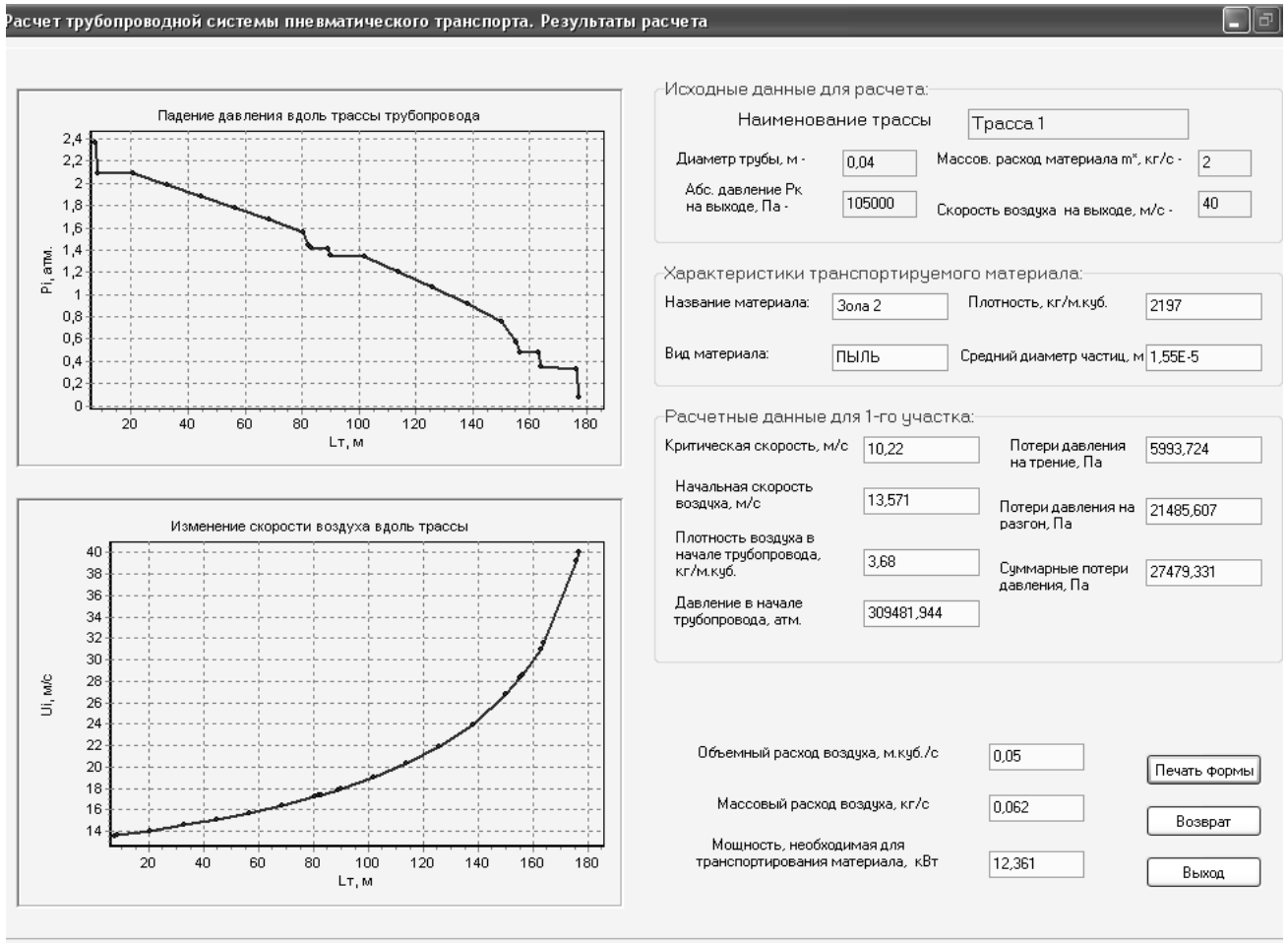


Рисунок 2 – Результати розрахунків і побудова графіків зміни тиску та швидкості транспортування вздовж траси трубопроводу

У третьому розділі розроблено метод розрахунку інтегральних параметрів вертикальних висхідних аеродисперсних потоків.

Поняття критичної швидкості пневмотранспортування у вертикальній трубі й аналогічної швидкості в горизонтальній трубі однакові в тому сенсі, що обидві ці швидкості характеризують максимальну транспортуючу здатність вертикального і горизонтального потоків газу відповідно. При цьому, як показують результати експериментів, у критичних режимах пневмотранспортування по вертикальних і горизонтальних трубах спостерігається мінімум питомих перепадів тиску. Однак це не означає, що значення критичних швидкостей в горизонтальній і вертикальній трубах за інших рівних умов однакові. Ці швидкості повинні бути різними, оскільки вертикальні й горизонтальні аеродисперсні потоки в критичному режимі істотно відрізняються один від одного своєю структурою. На відміну від горизонтальних асиметричних потоків з нерівномірним розподілом твердих часток по глибині, вертикальні потоки є осесиметричними і характеризуються практично рівномірним розподілом концентрації твердих часток поперек потоку. Отже, сили тертя твердих часток об стінку труби, обумовлені ефектом зіткнення цих часток з границями потоку, діють у вертикальній трубі по всьому периметру живого перерізу, тоді як в горизонтальних потоках аналогічні сили тертя зосереджені переважно в нижній частині периметра, тобто біля нижньої стінки труби. Частина енергії висхідного

поток газу витрачається на підтримку твердих часток у завислому стані. У горизонтальних же потоках у разі критичних швидкостей пневмотранспортування основна маса твердого матеріалу переміщується лише в напівзавислому стані біля дна труби. Тому є підстава стверджувати, що критична швидкість $u_{в.кр}$ вертикального потоку повинна бути за однакових умов пневмотранспортування більшою від критичної швидкості $u_{кр}$ горизонтального потоку. Але ці швидкості повинні бути взаємопов'язані.

Щоб отримати розрахункову формулу для визначення критичної швидкості вертикального потоку використано підхід, в основі якого лежить взаємозв'язок цих двох швидкостей. Тобто, якщо для заданих умов пневмотранспортування (масова витрата, діаметр труби, середня крупність й густина твердих часток) визначено розрахункове значення критичної швидкості $u_{кр}$, то, на основі функціональної залежності швидкості $u_{в.кр}$ від $u_{кр}$ знайдено величину $u_{в.кр}$ для тих же самих заданих умов пневмотранспортування.

Оскільки узагальненою характеристикою сипкого матеріалу є число Рейнольдса Re_T , можна записати:

$$\frac{u_{в.кр}}{u_{кр}} = f(Re_T). \quad (36)$$

При пневмотранспортуванні дрібнозернистих твердих матеріалів, для яких число $Re_T \leq 6$, структуру аеродисперсних потоків, так само як і критичні швидкості $u_{кр}$ і $u_{в.кр}$, в послідовно з'єднаних між собою горизонтальній і вертикальній трубах можна вважати приблизно однаковими, оскільки в горизонтальній трубі розподіл твердих часток уперек потоку в даному випадку близький до рівномірного. Тому у граничному випадку, коли $Re_T \leq 6$, маємо $\varphi = 1$. Цей висновок підтверджується результатами експериментальних досліджень вертикальних аеродисперсних потоків таких вчених, як G.E. Klinzing, R.D. Marcus, F. Rizk та ін.

За тими ж дослідженнями потоків крупнозернистих матеріалів експериментально знайдено значення функції φ для стиропору – $\varphi = 1,33$, при $Re_T = 793$ для цього матеріалу.

Припускаючи лінійний характер зміни φ від Re_T , можемо написати, з урахуванням (36):

$$u_{в.кр} = \left(1 + 0,1544 \lg \frac{Re_T}{6} \right) u_{кр}, \quad (37)$$

де $Re_T \geq 6$.

Отже, щоб визначити критичну швидкість $u_{в.кр}$ для висхідного потоку аеросуміші у вертикальній трубі, досить визначити розрахунковим шляхом критичну швидкість для горизонтальної труби, а потім за формулою (37) – швидкість $u_{в.кр}$.

Другим важливим параметром висхідного вертикального потоку є питомі втрати тиску, які в даному випадку дорівнюють:

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_e = \left(\frac{\Delta P_{TP}}{L}\right)_e + \rho_p g, \quad (38)$$

де $\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_e$ – питомі втрати тиску на тертя в висхідному потоці.

Для визначення питомого перепаду тиску у вертикальних висхідних потоках аеросуміші одержані рівняння:

$$\left(\frac{\Delta P_{TP}}{L}\right)_e = \bar{\lambda}_e \bar{\rho}_f (1 + \mu_v)^2 \left(\frac{\Delta P_{TP}}{L}\right)_\Gamma; \quad (39)$$

$$\bar{\lambda}_e = 1 + 0,173 \left(\lg \frac{\text{Re}_T}{6}\right)^{1,94} \left[1 - th\left(3,6 \left(1 - \frac{u_{в.кр}}{u}\right)\right)\right] th\left(0,93 \mu_v^{0,8}\right); \quad (40)$$

$$\left(\frac{\Delta P_{TP}}{L}\right)_\Gamma = \lambda \frac{\rho u^2}{2D}. \quad (41)$$

Результати порівняння розрахункових значень $\left(\frac{\Delta P_{TP}}{L}\right)_e$, одержаних за даною методикою, з експериментальними даними дають розбіжність не більше 10%, що свідчить про їх достовірність.

Четвертий розділ присвячено розробці аналітичного методу визначення втрати тиску у вигинах (колінах) транспортного трубопроводу.

Коліна є невід'ємною частиною промислових ПТС і їх наявність має бути врахована при гідравлічних розрахунках трубопровідних систем. На жаль діючі методики аеродинамічного розрахунку колін побудовано на емпіричних залежностях для однорідних потоків з їх корекцією під двофазний аеродисперсний потік. Природно, що результати розрахунків за цими методиками мають значні похибки, які для ПТС з великою кількістю колін можуть виявитися неприйнятними.

Рух аеродисперсного потоку в коліні відбувається наступним чином. У вигинах трубопроводу на тверді частки перпендикулярно до напрямку руху діє відцентрова сила, яка в багато разів перевищує силу тяжіння. Під впливом відцентрової сили частки витісняються в напрямку зовнішньої стінки коліна, вздовж якої вони продовжують сковзати щільним потоком. Невелика частина дрібних часток утримується за рахунок дифузії в потоці транспортуючого повітря, який плине внутрішньою частиною вигину. Таким чином, обидва потоки майже повністю розділяються між собою без помітної взаємодії в межах повороту, де сипкий матеріал рухається за інерцією по стінці труби, поступово втрачаючи швидкість.

У межах коліна відбувається падіння тиску за рахунок тертя повітря об поверхню щільного шару матеріалу та стінки труби. За поворотом тиск продовжує падати через втрати на прискорення матеріалу до попередньої швидкості. Характер цих змін представлено на рисунку 3.

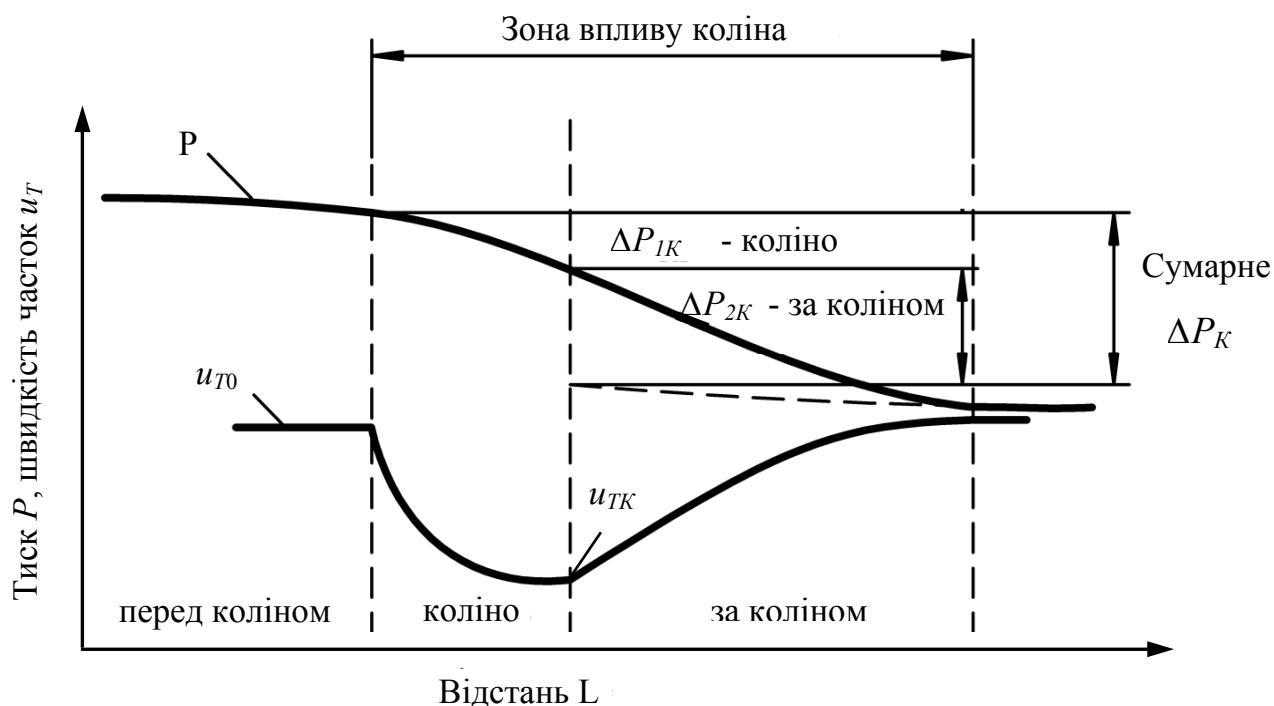


Рисунок 3 – Схема розподілу тиску та швидкості твердих часток у зоні впливу коліна транспортного трубопроводу

Таким чином, значна частина втрат тиску пов'язана з відновленням швидкості руху твердих часток за коліном, тому визначення швидкості руху матеріалу на виході із коліна є ключовим завданням.

Відомі методи розрахунку швидкості часток у кінці коліна таких дослідників, як Ф. Зуєв (1976 р.) і М. Чальцев (2005 р.) визначають швидкість твердого компоненту в коліні за умов його рівномірного розташування вздовж коліна під час транспортування.

Пізніші дослідження (G. Klinzing – 2000 р., P. Soft – 2006 р.) показують де-що іншу структуру осаду часток матеріалу на стінці коліна – з потовщенням цього шару (рисунок 4).

З метою уточнення методів розрахунку аеродисперсних потоків у вигині трубопроводу проаналізовано рух осаду за умови його потовщення вздовж коліна.

Розглянуто схему дії сили тяжіння G , відцентрової сили C , реакції стінки коліна та сили тертя на тверду частку змінної маси в коліні, розташованому у вертикальній площині (рисунок 5).

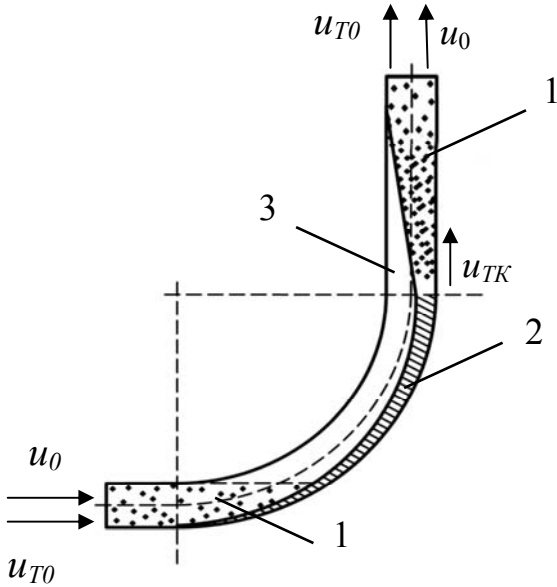


Рисунок 4 – Схема аеродисперсного потоку в коліні:

- 1 – розбавлений потік матеріалу;
- 2 – суцільний потік матеріалу;
- 3 – потік повітря

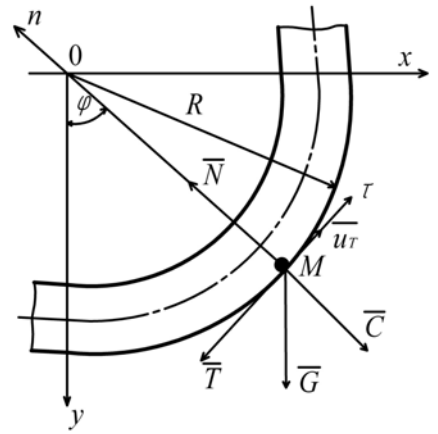


Рисунок 5 – Розрахункова схема коліна

Визначено геометричні параметри профілю стрічки матеріалу, зокрема змінного радіуса λ , та товщини шару часток h_{\max} на виході з коліна (рисунок 6).

У результаті визначено форму, об'єм та масу стрічки матеріалу, що осів в коліні (рисунок 7).

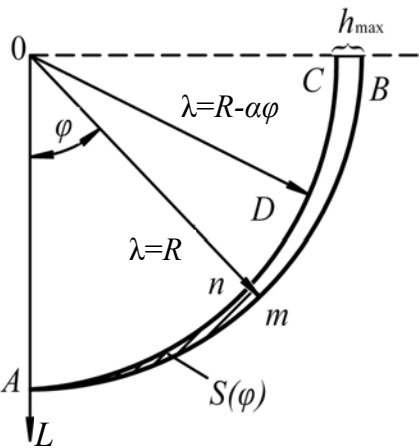


Рисунок 6 – Схема шару осаджених в коліні часток матеріалу

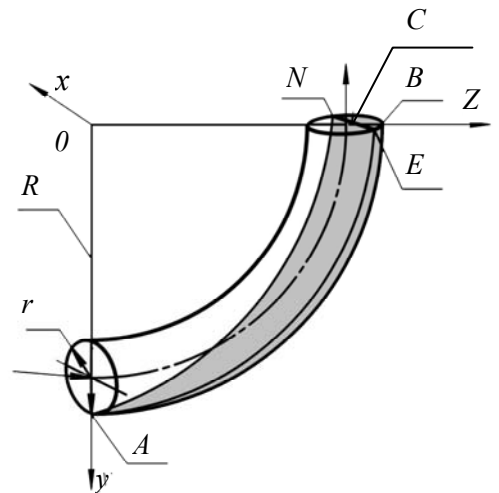


Рисунок 7 – Форма шару осаджених часток в коліні трубопроводу

За результатами виконаних досліджень отримано формулу для розрахунку швидкості твердого компонента в коліні, що розташоване у вертикальній площині:

$$u_T(\varphi) = \sqrt{u_{T0}^2 \cdot e^{2(P(0)-f\varphi-\bar{P}(\varphi))} - 2gR e^{-2(f\varphi+2\bar{P}(\varphi))} \cdot \psi(\varphi)} , \quad (42)$$

де

$$\psi(\varphi) = \int_0^\varphi (f \cos \varphi + \sin \varphi) \cdot e^{2f\varphi-3 \left[D \ln(\varphi-\varphi_1) + 0,5E \ln(\varphi^2+p\varphi) + \frac{2F-Ep}{2q-0,5p^2} \operatorname{arctg} \frac{2\varphi+p}{2q-0,5p^2} \right]} d\varphi .$$

Одержану формулу (42) перетворюємо з урахуванням умови сталості товщини шару осаду часток, і отримуємо формулу аналогічну формулі М. М. Чальцева (2005 р.) для коліна з поворотом на кут $\varphi = 90^0$:

$$u_{TK} = \sqrt{\frac{u_{T0}^2}{e^{\pi f}} - \frac{2gR}{1+4f^2} \left(\frac{1-2f^2}{e^{\pi f}} + 3f \right)} . \quad (43)$$

Як відомо, сумарні втрати тиску ΔP_K при повороті потоку становлять:

$$\Delta P_K = \Delta P_{1K} + \Delta P_{2K} , \quad (44)$$

де ΔP_{1K} – втрати тиску на тертя повітря безпосередньо в коліні;

ΔP_{2K} – втрати тиску на відновлення швидкості твердого компонента за коліном (втрати на розгін).

Перша складова втрат тиску в коліні може бути визначена за формулою:

$$\Delta P_{1K} = \frac{0,029 + 0,304 \left[\operatorname{Re}(r/R_K) \right]^{-0,25}}{(R_K/r)^{0,5}} \frac{L_K \rho u^2}{2D} , \quad (45)$$

де r – радіус труби;

R_K – радіус вигину коліна;

L_K – розгорнута довжина коліна.

Втрати тиску на відновлення швидкості твердого матеріалу за коліном можна розрахувати за формулою Маркуса:

$$\Delta P_{2K} = (0,5 + \mu \frac{u_{T0} - u_{TK}}{u_{T0}}) \rho u_{T0}^2 . \quad (46)$$

Також відома емпірична формула для розрахунку середньої швидкості твердих часток u_T з заданою швидкістю несучого повітря u для сталого потоку (Клінзінг):

$$u_{T0} = u_0 (1 - 0,68 d_T^{0,92} \rho_T^{0,5} \rho^{-0,2} D^{-0,54}) . \quad (47)$$

Таким чином, рівняння (42–47) складають замкнуту систему для аеродинамічного розрахунку параметрів аеродисперсних потоків у вигинах трубопроводів.

За формулами (42–47) було проведено порівняльні розрахунки швидкості твердого компонента на виході з коліна труби $D = 0,05$ м, поворотом на кут

$\varphi = 90^0$, з радіусом вигину коліна $R = 0,3$ м, розташованому у вертикальній площині, а також відповідних втрат тиску під час транспортування цементу. Графіки розрахунку втрат тиску представлено на рисунку 8. Згідно з графіками, точність розрахунків за новою методикою, що передбачає потовщення шару осаду твердих часток вздовж коліна, помітно перевищує точність розрахунків за спрощеним варіантом (постійна товщина осаду).

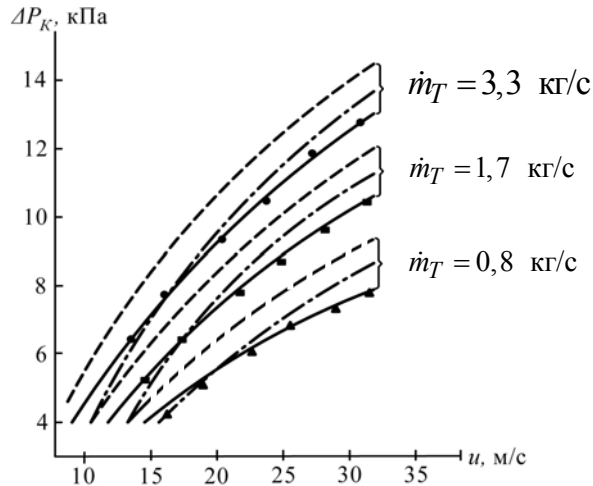


Рисунок 8 – Графіки розрахунку втрат тиску в коліні трубопроводу:

- — експериментальні;
- - - - - — для випадку рівномірного розподілу осаджених у коліні часток;
- · - · - · — для випадку нерівномірного розподілу осаджених у коліні часток

Таким чином, формула (42) може бути рекомендована для аеродинамічного розрахунку колін пневмотранспортних трубопроводів.

У п'ятому розділі представлено схеми експериментальних стендів, методики обробки експериментів, результати емпіричних досліджень, перевірка достовірності запропонованих методик розрахунку.

Для виконання експериментальних досліджень на території АДІ ДВНЗ «ДонНТУ» побудовано універсальний дослідний стенд на базі пневмотранспортної установки промислового масштабу, обладнаний сучасними засобами контролю-вимірювальної техніки. У комплект стенду входить поршневий компресор продуктивністю $5 \text{ м}^3/\text{хв}$ з тиском на виході до $0,6 \text{ МПа}$ і повітрязбірник об'ємом 8 м^3 .

Пневмотранспортна установка безперервної дії (рисунок 9) обладнана двокамерним насосом у малогабаритному виконанні, з об'ємом камери $0,045 \text{ м}^3$, продуктивністю по цементу 20 т/год . Транспортний трубопровід двоступінчастий, діаметром $D = 50 \text{ мм}$ і $D = 80 \text{ мм}$, загальною довжиною $L = 80 \text{ м}$, має 12 колін з поворотом на 90^0 у вертикальній площині. Бункер живильника об'ємом $0,64 \text{ м}^3$ містить запас досліджуваного сипкого матеріалу. Очищення повітря від пилу забезпечено двома циклонами і осаджувальною камерою з тканинним фільтром на виході. Під час проведення деяких дослідів замість камерного живильника було встановлено струминний насос.

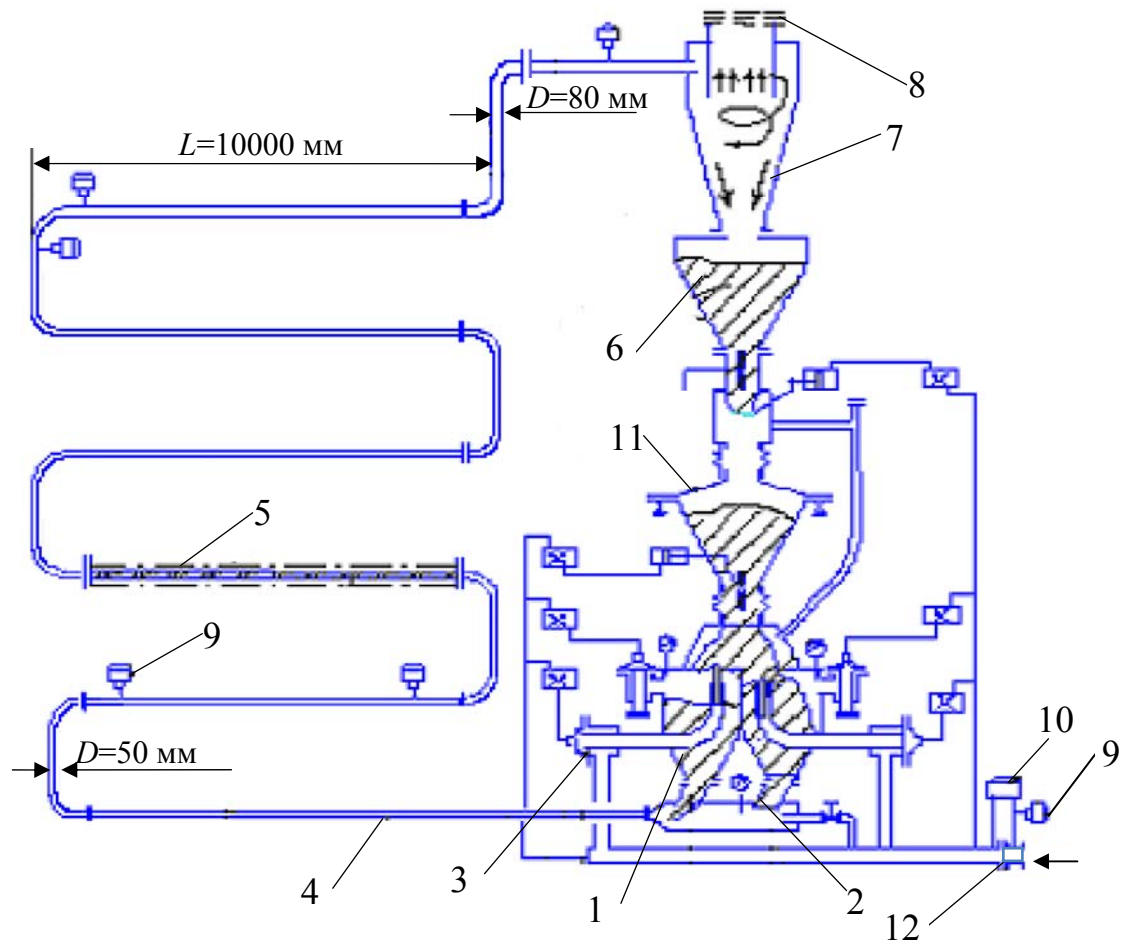


Рисунок 9 – Схема випробувального стенду АДІ ДВНЗ «ДонНТУ»:
 1 – живильник двокамерний; 2 – затвор вантажний; 3 – клапан повітряний;
 4 – трубопровід транспортний; 5 – вставка прозора; 6 – бункер; 7 – циклон;
 8 – фільтр тканинний; 9 – датчики тиску; 10 – датчик перепаду тиску;
 11 – дозатор ваговий; 12 – звужувальний пристрій

На стенді вивчались закономірності втрат тиску в пневмотранспортному трубопроводі, а також критичні швидкості транспортування.

Аеродисперсний потік в трубопроводі, довжина якого значно перевищує його діаметр, можна розглядати як сталий рівномірний. Це означає, що коливання величини швидкості в напрямку, перпендикулярному до напрямку руху, дуже малі й до уваги не приймаються, швидкості обох компонентів у поперечному перерізі потоку постійні.

Величина сумарних втрат тиску для обох фаз складається із втрат тиску на подолання тертя об стінку трубопроводу та між собою, прискорення матеріалу (розгін), повороти потоку. На підставі принципу накладення втрат тиску, який вперше використав І. Гастершдадт, сумарні втрати тиску можна представити у вигляді:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P + \Delta P_p + \Delta P_{TP} + \Delta P_K ,$$

де ΔP – втрати тиску на тертя повітря;

ΔP_p – втрати тиску на розгін матеріалів, що транспортуються;

ΔP_{TP} – додаткові втрати тиску на тертя за рахунок присутності твердих часток;

ΔP_K – втрати тиску у вигинах трубопроводу.

За результатами замірів отримано фазові діаграми для аеродисперсних потоків з вмістом цементу, кам'яновугільної золи та вугільного пилу у прямих горизонтальних трубах, що представлені на рисунку 10.

На діаграмах значками O , Δ , \square та \times позначено контрольні точки, отримані в ході вимірів, а суцільними лініями, що огинають їх – експериментальні криві. Точки, що відповідають екстремуму (мінімуму) кривих для питомих втрат тиску при заданих масах витратах твердого матеріалу, стосуються критичного режиму пневмотранспортування. Суцільні лінії, що їх з'єднують, відносяться до критичних швидкостей потоку.

Для порівняння на рисунку 10 нанесено пунктиром розрахункові криві $\frac{\Delta P_{кр}}{L} = f(u)$ і відповідні їм розрахункові залежності $u_{кр} = f(\frac{\Delta P_{кр}}{L}, \dot{m}_T)$, що отримані в результаті комп'ютерної реалізації розрахунків за методикою, наведеною в розділі 2. Видно, що розрахункові значення основних параметрів пневмотранспортування цілком задовільно узгоджуються з експериментальними значеннями.

Для визначення достовірності одержаних методик розрахунку використано також експериментальний матеріал по замірах параметрів $\frac{\Delta P}{L}$ і $u_{кр}$, одержаних іншими дослідниками. Усі дослідні дані відповідають широкому діапазону зміни умов пневмотранспортування: $0,021\text{мм} \leq d_T \leq 7\text{мм}$; $1000\text{кг/м}^3 \leq \rho_T \leq 4500\text{кг/м}^3$; $25 \text{ кг/год} \leq \dot{m}_T \leq 20000 \text{ кг/год}$; $25,4\text{мм} \leq D \leq 100\text{мм}$. Установлено, що середні відносні відхилення розрахункових значень параметрів $\frac{\Delta P}{L}$ і $u_{кр}$ від відповідних експериментальних значень знаходяться у межах точності виміру цих параметрів, що свідчить про досить високий ступінь достовірності розроблених методик розрахунку.

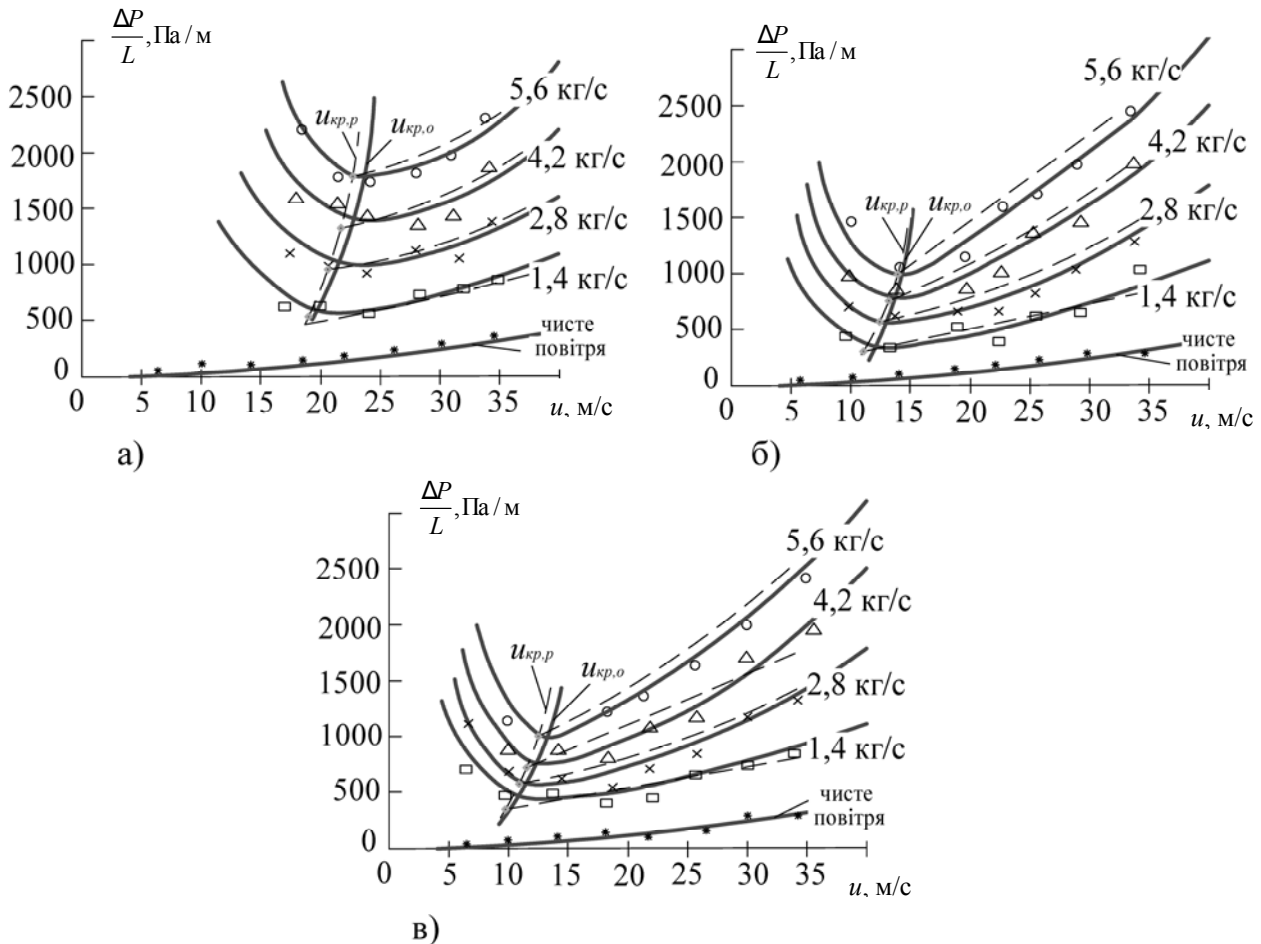


Рисунок 10 – Графіки залежності $\frac{\Delta P}{L}$ від u при русі аеросумішей

у горизонтальному трубопроводі $D = 50$ мм:

- | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| а) цемент: | б) зола: | в) вугільний пил: |
| $d_T = 21$ мкм, | $d_T = 23$ мкм, | $d_T = 50$ мкм, |
| $\rho_T = 3060$ кг/м ³ ; | $\rho_T = 2400$ кг/м ³ ; | $\rho_T = 1600$ кг/м ³ . |

Втрати тиску на поворотах потоку мають місце як в самому коліні, так і після повороту, що пов'язано з відновленням швидкості твердих часток, втраченої в коліні. У зв'язку з цим в дослідях по вивченню втрат тиску на поворотах потоку точки вимірів тиску було встановлено на вході в коліно, на виході з нього, а також 8 точок – на прямолінійній ділянці трубопроводу за коліном з інтервалом у 0,5 м. Досліди проводилися в коліні з поворотом на 90°, радіусом вигину $R = 300$ мм, діаметром труби $D = 50$ мм, розташованим у вертикальній площині.

На рисунку 11 наведено графіки зміни втрат тиску в коліні в залежності від швидкості повітря та масової витрати цементу, що отримані в ході експериментів.

Отримана експериментальна залежність узгоджується з аналітичними дослідженнями, наведеними в розділі 4.

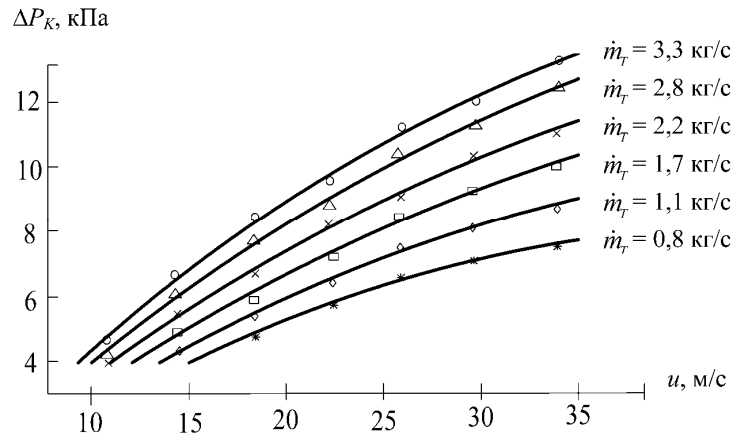


Рисунок 11 – Залежність втрат тиску від швидкості повітря в коліні трубопроводу $D = 50$ мм, $R/D = 6$ з кутом повороту 90^0 при транспортуванні цементу

Шостий розділ присвячено розвитку технологій пневмотранспорту з використанням малогабаритних живильників камерного типу.

Камерний живильник є однією з основних ланок системи пневматичного транспортування сипких матеріалів. У ньому готується й уводиться в трубопровід аеродисперсна суміш, яка потім транспортується уздовж труби, у тому числі за рахунок енергії стисненого повітря, накопиченої у живильнику.

У порівнянні з іншими видами живильників (пневмогвинтовими, шлюзовими, струминними та ін.) камерний живильник володіє низкою переваг, такими як простота пристрою, економічність, відсутність приводу і частин, що обертаються в абразивному середовищі.

В останні роки збільшився попит на пневмотранспортні системи підвищеної продуктивності й дальності подачі. Для таких систем камерний живильник також найбільш прийнятний, оскільки у нього не існує принципових обмежень на збільшення концентрації суміші та тиску в трубопроводі до необхідного рівня.

Істотним недоліком сучасних камерних живильників є збільшені, в порівнянні з іншими типами живильників, габарити по висоті. Основний на території СНД виробник – машинобудівний завод Бецема (м. Красногірськ) випускає камерні живильники типу ТА з висотою камери 5 і більше метрів, у той час як висота аналогічних їм за продуктивністю пневмогвинтових живильників не перевищує одного метра. Великовантажні живильники, крім збільшення матеріаломісткості їх виготовлення, характеризуються підвищеними енерговитратами на вивантаження сипкого матеріалу з камери та іншими недоліками.

Для усунення цих недоліків було розроблено і здійснено концепцію нового малогабаритного камерного живильника (МКЖ). За аналогією з поршневым компресором або гідравлічним насосом малогабаритний камерний живильник здатний забезпечити стабільний потік дрібнофракційного сипкого матеріалу в жорстко заданому швидкісному режимі. Роль поршня в цьому випадку виконує одна з фаз транспортного процесу.

З метою реалізації ідеї малогабаритного камерного живильника у Автомобільно-дорожньому інституті ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» було виконано дослідницькі та проектно-конструкторські роботи, у результа-

ті яких створено і випробувано в промислових умовах дослідні зразки МКЖ. У процесі досліджень було розроблено концепцію управління живильників, теорію вивантаження матеріалу під тиском, рекомендації з конструювання основних вузлів та рекомендації з використання МКЖ.

На базі МКЖ створено нові технології пневматичного транспорту.

Відомо, що чим більше висота засипки, тим вище тиск і більша витрата повітря, які необхідні для вивантаження матеріалу з камери. Іншими словами, потрібні підвищені витрати енергії.

Для кожної конкретної системи пневматичного транспорту може бути визначена мінімальна величина рівня насипу матеріалу в камеру живильника, яка забезпечувала б задану продуктивність системи з мінімальними енерговитратами.

Суть нової технології полягає в наступному (Пат. 45804 UA Україна). З метою зменшення енерговитрат висоту шару сипкого матеріалу в камері встановлюють такою, щоб тиск, необхідний для його вивантаження в транспортний трубопровід, перевищував би тиск на початку транспортного трубопроводу не більше, ніж у 1,1-1,2 рази. Відповідна висота шару контролюється датчиком рівня. Пояснювальну схему пневмотранспортної системи з однокамерним живильником представлено на рисунку 12.

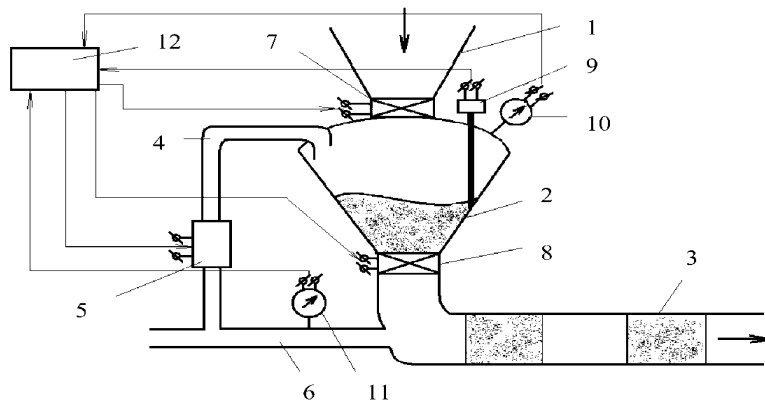


Рисунок 12 – Технологічна схема МКЖ:

1 – бункер; 2 – камера; 3 – транспортний трубопровід; 4 – патрубок подачі повітря до камери; 5 – регулюючий клапан; 6 – патрубок подачі повітря в трубопровід; 7 – клапан завантажувальний; 8 – клапан розвантажувальний; 9 – датчик рівня; 10, 11 – датчики тиску; 12 – блок управління

Пневмотранспортування здійснюється наступним чином. Сипкий матеріал через завантажувальну воронку 1 і відкритий затвор 8 самопливом подають до камери 2. У разі досягнення матеріалом заданого рівня спрацьовує датчик рівня 9, за сигналом якого блок керування 12 видає команди: «затвор 7 закрити» і «клапан 5 відкрити». При цьому завантаження припиняється і в камеру подається стиснене повітря, яке при тиску, що перевищує тиск на початку транспортного трубопроводу, не більше, ніж в 1,1–1,2 рази витискає в транспортний трубопровід порцію матеріалу. Надалі процес введення сипкого матеріалу в трубопровід окремими порціями продовжується.

Роль поршня у цьому випадку виконує одна з фаз транспортного процесу –

сипкий матеріал.

Для виявлення величини тиску повітря у верхній частині камери, що забезпечує вказане співвідношення тиску в трубопроводі та поперечному перерізі випускного отвору проведено аналітичні дослідження закону розподілу по вертикалі камери статичних сил і напруг в сипкому тілі циліндроконічної форми за методом Янсена.

Розрахункову схему представлено на рисунку 14.

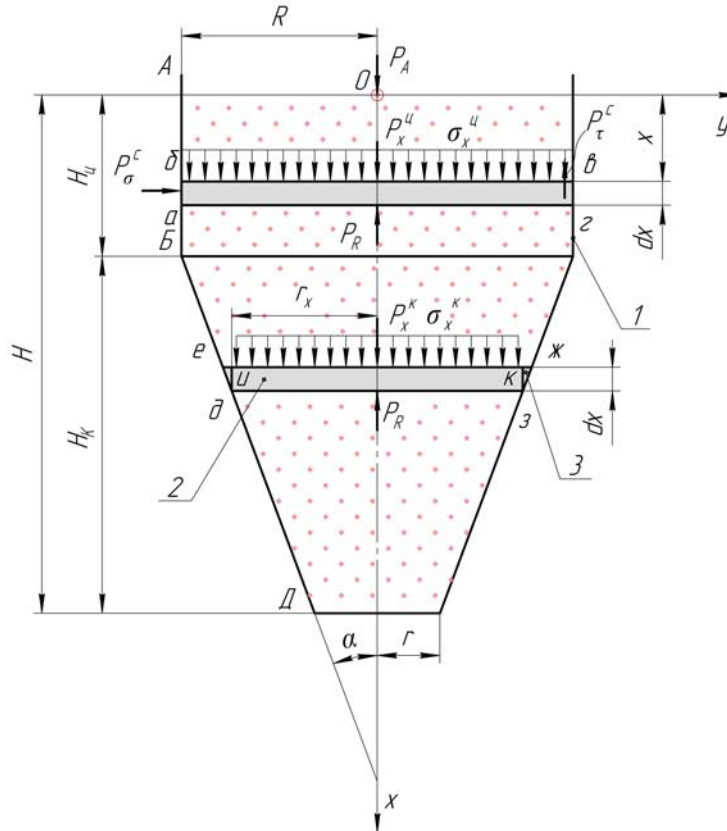


Рисунок 14 – Схема сил і напруг у камері циліндроконічної форми

Тут прийняті припущення та позначення:

$$\sigma^u = \psi \sigma_x;$$

σ_A – напруга в площині А;

σ_B – напруга в площині Б;

σ_D – напруга в площині Д.

В результаті теоретичних досліджень отримано залежність

$$\sigma_A = \left[\frac{\sigma_D + \frac{B}{A}}{\left(\frac{r}{r + H_K \operatorname{tg} \alpha} \right)^{\frac{-A}{\operatorname{tg} \alpha}}} - \frac{B}{A} + \frac{2C_R}{\psi_1} (1 - e^{\psi_1 H_{Ц}}) \right] e^{-\psi_1 H_{Ц}}, \quad (48)$$

де $\sigma_D = (1,1 \div 1,2) \sigma_{TP}$.

Окрім цього в цій главі проведено аналіз аеродинамічних параметрів мало-

габаритних камерних живильників і розроблено методи їх визначення.

Отримані наукові результати дозволили сформулювати принципи та рекомендації щодо конструкції МКЖ, які були використані під час проектування та впровадження МКЖ на промислових підприємствах України та Росії.

Розроблено фізично обґрунтовану модель перехідних процесів розвантаження живильника і методу розрахунку сил і напружень у камері живильника циліндроконічної форми.

Вироблено основні принципи та рекомендації щодо конструкції МКЖ.

Результати виконаних досліджень використано під час проектування та впровадження МКЖ на промислових підприємствах України.

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій здійснено теоретичне узагальнення і вирішення великої науково-технічної проблеми розробки науково обґрунтованих методів аеродинамічного розрахунку пневмотранспортних систем промислового призначення і створення малогабаритних камерних живильників, що має важливе народногосподарське значення.

1. Для усталеного потоку аеросуміші, як стисливого середовища, розроблені аеродинамічні рівняння нерозривності, енергобалансу і гідравлічних опорів, які визначають інтегральні параметри пневмотранспортування сипких матеріалів.

2. Складено узагальнене рівняння Бернуллі для неізотермічного, в загальному випадку, аеродисперсного потоку математично точним і фізично обґрунтованим методом.

3. Розроблено узагальнені науково обґрунтовані методи розрахунку інтегральних параметрів (питомих втрат тиску і критичної швидкості потоку) для ізотермічного, рівномірного руху аеросумішей по горизонтальних і вертикальних трубах для випадку малих відносних перепадів тиску на кінцях труби, наприклад, при її малій довжині, коли стисливістю повітря можна знехтувати і вважати, що його густина незмінна по всій довжині труби. При порівняно великих відносних перепадах тиску враховується характер зміни густини повітря в залежності від тиску.

4. Складено рівняння для визначення критичної швидкості пневмотранспортування на базі критерію рівності усередненого дотичного напруження аеросуміші на нижній стінці труби і інтенсивності сили тертя ковзання твердого матеріалу на тій же стінці, який визначає критичний режим пневмотранспортування по прямих горизонтальних трубах і відповідає мінімальному значенню питомої перепаду тиску при заданій концентрації аеросуміші.

5. Встановлено, що при пневмотранспортуванні дрібнозернистих матеріалів з числом Рейнольдса $Re_T \leq 6$ критична швидкість потоку $u_{в,кр}$ на вертикальних ділянках трубопроводу змінюється за логарифмічним законом в залежності від швидкості $u_{кр}$ в горизонтальній трубі.

6. Побудована фізична модель двофазного потоку у вигині трубопроводу, заснована на припущенні про повний поділ фаз під дією відцентрових сил і на її основі розроблена методика розрахунку такого роду місцевих гідравлічних

опорів, яка визначає зниження швидкості твердого матеріалу в коліні, його подальший розгін за поворотом і відповідні втрати енергії.

7. Розроблено методику, алгоритм і програмне забезпечення аеродинамічного розрахунку пневмотранспортних трубопроводів. Програма забезпечує реалізацію на ПЕОМ розрахунків трубопроводів будь-яких конфігурацій і довжин з урахуванням, при необхідності, стисливості газової фази аеросуміші.

8. Достовірність розроблених методик розрахунку основних параметрів пневмотранспортування підтверджується цілком задовільним збігом розрахункових значень цих параметрів з особистими і відомими експериментальними даними в широкому діапазоні зміни умов пневмотранспортування.

9. На універсальному експериментальному стенді АДІ ДВНЗ «Дон НТУ» проведено дослідження основних параметрів руху аеросумішей. Досліджено втрати тиску на різних ділянках транспортного трубопроводу (розгону, рівномірного руху, повороту) для різних швидкостей потоку і масових витрат сипучого матеріалу. Встановлено, зокрема, що втрати тиску при русі аеросуміші в колінах проявляються в основному за поворотом, що пов'язано з прискоренням загальмованих при повороті твердих частинок. До того ж гідравлічні опори на ділянках розгону і на поворотах мають однакову природу.

10. Розроблено новий тип живильника пневмотранспортних систем - малогабаритний камерний живильник. Від діючих аналогів він відрізняється не тільки габаритами, а й способом управління, який полягає в тому, що за допомогою датчика рівня задається така висота засипки, для вивантаження якої необхідно тиск у камері живильника, який мінімально перевищує протитиск в трубопроводі при сталому режимі транспортування. Такий спосіб транспортування забезпечує зниження енергетичних витрат і стабільний режим роботи ПТС. Винахід підтверджено патентом України № 45804 «Способ пневматического транспортирования мелкофракционных сыпучих материалов» / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев [1].

11. Отримав подальший розвиток метод аналізу розподілу сил по висоті камери живильника циліндро-конічної форми.

12. Розроблено метод визначення розвантажувальних характеристик малогабаритного камерного живильника.

13. Здійснено промислові випробування зразків конструкцій малогабаритних камерних живильників на теплових електростанціях та підприємствах будівельної індустрії:

– на Слов'янській ТЕС в лінії подачі вугільного пилу з пилоприготувального цеху на енергоблок введено в експлуатацію малогабаритний камерний насос НК 5 (продуктивність – 60 т / год, ємність камери – 1,25 м³);

– на Семипалатинській ТЕС (Казахстан) в лінії видалення золи впроваджений камерний насос НК 3 (продуктивність – 12 т / год, ємність камери – 0,3 м³);

– на Алуштинському ЖБК в лінії подачі цементу з силосів в бетонорозчиннозмішувальні установки впроваджено камерний насос НК 1 (продуктивність – 15 т / год, ємність камери – 0,3 м³).

14. Промислова апробація зразків конструкцій малогабаритних камерних живильників підтвердила високу ефективність розробленої методології розрахунку і проектування пневмотранспортного обладнання. На Слов'янській ТЕС прий-

нято рішення про поступову заміну пневмогвинтових насосів на камерні конструкції АДІ ДВНЗ «ДонНТУ». У 2012 році заплановані виготовлення і установка 10 модернізованих малогабаритних камерних насосів.

15. Результати дисертаційної роботи дозволили отримати реальний річний економічний ефект на один МКЖ – 400000 грн. Очікуваний річний економічний ефект на 10 МКЖ становить 4 млн грн.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Чальцев М.Н. К расчету критической скорости в системах пневматического трубопроводного транспорта / М.Н. Чальцев // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технологічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград, 2000. – Вип.7. – С. 125 –129.

2. Чальцев М.Н. О гидравлическом расчете трубопроводов для пневмотранспортных систем / М.Н. Чальцев // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Сер. Машиностроение. – 2000. – Т.1, № 38. – С. 50 –53.

3. Чальцев М.Н. Исследования и разработка малогабаритных камерных питателей / М.Н. Чальцев // Научные труды Кременчугского государственного политехнического института. Вып. 1/2000 (8). – Кременчуг, КГПИ, – 2000. – С. 325 – 329.

4. Чальцев М.Н. Анализ распределения давления в цилиндроконической камере питателя / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев // Автомобильный транспорт. Серия «Совершенствование машин для земляных и дорожных работ»: сборник научных трудов ХГАДТУ. – Харьков, 2000. – Вып. 5. – С. 37 – 38. *Особистий внесок: Складено рівняння розподілу тиску в камері живильника.*

5. Чальцев М.Н. Методика расчета критического режима пневмотранспорта при малых перепадах давления / М.Н. Чальцев, С.И. Криль // Технології в машинобудуванні: Вістник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків, 2001. – Вип. 129, Ч.1. – С. 240–247. *Особистий внесок: Виконано аналіз критичного режиму пневмотранспортування.*

6. Чальцев М.Н. Теоретические исследования потерь давления при пневмотранспорте по горизонтальным трубам / М.Н. Чальцев // Труды международной научно-технической конференции «Горная энергомеханика и автоматика». Т.2. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – С. 204 – 210.

7. Пат. 45804 UA Україна МПК В65G 53/04. Спосіб пневматичного транспортування дрібнофракційних сипучих матеріалів / М.М. Чальцев, Б.Є. Бугайов– № 2001074787; заявл. 10.07.2001; опубл. 01.02.04, Бюл. № 9. *Особистий внесок: Запропоновано спосіб визначення порівняння тиску у живильнику та у транспортному трубопроводі.*

8. Чальцев М.Н. Уравнение Бернулли для потока газозвеси / С.И. Криль, М.Н. Чальцев // Прикладна гідромеханіка / Національна академія наук України. Інститут гідромеханіки. – 2004. – Т. 6 (78). – №1. – С. 3 – 8. *Особистий внесок: Розроблено рівняння Бернуллі для ізотермічного процесу пневмотранспортування.*

9. Чальцев М.Н. Аналитический метод гидравлического расчета

пневмотранспортных трубопроводов / М.Н. Чальцев // Сборник научных трудов Национального горного университета. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – № 19. – С. 140–144.

10. Чальцев М.Н. Разгрузочные характеристики малогабаритного камерного питателя / М.Н. Чальцев // Весник национального технического университета «ХПИ»: сборник научных трудов. Тематический вып. «Динамика и прочность машин». – 2004. – № 20. – С. 133 – 144.

11. Чальцев М.Н. Гидравлический расчет потока газовзвеси/ М.Н. Чальцев, С.И. Криль // Промислова гідраліка і пневматика. – Вінниця: ВДАУ, 2005. – № 4 (10). – С. 26 – 29. *Особистий внесок: Розроблено рівняння залежності тиску у горизонтальному потоці від фізико-механічних параметрів матеріалу.*

12. Чальцев М.Н. Критическая скорость пневмотранспортирования в восходящем потоке / М.Н. Чальцев, С.И. Криль // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В.Даля. – Луганськ, 2007. – №3(109), Ч.2. – С. 204 – 208. *Особистий внесок: Виведені рівняння критичної швидкості для дрібнофракційних матеріалів.*

13. Чальцев М.Н. Методы расчета интегральных параметров пневмотранспортирования крупнодисперсных твердых материалов / М.Н. Чальцев, С. И. Криль // Промислова гідраліка та пневматика. – 2007.– №1(15). – С. 21–24. *Особистий внесок: Розроблені методи розрахунку критичних режимів для крупно дисперсних твердих матеріалів.*

14. Чальцев М.Н. Аналитические и экспериментальные исследования критических режимов пневмотранспортирования сыпучих материалов / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник / АДІ ДВНЗ «ДонНТУ», Горлівка, 2010. – №1(10).– С. 5 – 11. *Особистий внесок: Виконано аналітичні дослідження критичних режимів пневмотранспортування.*

15. Чальцев М.Н. Влияние диаметра трубы и массового расхода мелкодисперсного твердого материала на критическую скорость воздуха и удельный перепад давления при пневмотранспорте / М.Н. Чальцев, В.И. Скороход, В.В. Фадеичев, Л.С. Орлова // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки: науково-технічний збірник Київського національного університету будівництва і архітектури. – Київ, 2010. – Вип. 15. – С. 169 – 173. *Особистий внесок: Виконано експериментальні дослідження впливу масової втрати матеріалу на втрати повітря у критичному режимі.*

16. Чальцев М.Н. К вопросу о методиках расчета основных параметров пневмотранспорта сыпучих материалов по горизонтальным трубам / М.Н. Чальцев, С.И. Криль // Прикладна гідромеханіка. – Київ, 2010. – №4 (84), Т.12. – С. 36 – 44. *Особистий внесок: Обґрунтовано переваги створеної теоретичної моделі розрахунку параметрів пневмотранспортування.*

17. Chaltzev M. Design technique of the pneumotransport critical regime at minor differential pressure / M. Chaltzev // ТЕКА: Commission of motorisation and power industry in agriculture Lublin university of technology Volodymyr Dal East-ukrainian national university of Lugansk. – Lublin, 2011. – Vol. ХА. – P. 29 –38.

18. Chaltzev M. Analytical investigation into velocity change of the transported material in a pipeline bend / M.Chaltsev, L. Vovk // ТЕКА: Commission of motorisation and power industry in agriculture Lublin university of technology Volodymyr Dal East-ukrainian national university of Lugansk. – Lublin, 2011. – Vol.

XI В. – Р. 20 – 30. *Особистий внесок: Розроблено спосіб визначення об'єму та густини шару матеріалу в коліні.*

19. Чальцев М.Н. Совершенствование пневмотранспортных систем на тепловых электростанциях Донбасса / М.Н. Чальцев // Стратегия управления развитием региона на период до 2010 года (Донецкая область – 2010): материалы секции «Приоритеты научно-технического и инновационного развития», г. Донецк, 28 – 30 сентября 1999 года. – Донецк: ИЭПИ НАН Украины, 1999. – Т.2. – С.19 –24.

20. Чальцев М.М. Про аналогію деяких закономірностей гідромеханіки пневмо- і гідротранспортних систем / М.М. Чальцев // Вісник (Збірник наукових праць НТУ і ТАУ). – К.: РВВ НТУ, 2000. – Вип. 4. – С. 292 – 295.

21. Чальцев М.Н. Совершенствование пневмотранспортных систем для золы и угольной пыли на тепловых электростанциях Донбасса / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев // Вісник Східноукраїнського державного університету. – Луганськ, 2000. – №4(26). – С. 83 – 86. *Особистий внесок: Виконано аналіз обстежень пневмотранспортних систем, що застосовуються на теплових електростанціях Донбасу.*

22. Чальцев М.Н. Математическая модель вихревого эжектора / М.Н. Чальцев, С.В. Войцеховский // Научные труды Донецкого государственного технического университета. – Донецк: ДонГТУ, 2001. – Вып. 35. – С. 204 – 209. *Особистий внесок: Розроблено математичну модель завихрювача для ежектора.*

23. Чальцев М.Н. Моделирование двухфазного закрученного потока / М.Н. Чальцев, С.В. Войцеховский // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2002. – Вип. 51. – С. 194 – 199. *Особистий внесок: Отримано залежність енергетичних характеристик потоку від ступеня закрутки.*

24. Чальцев М.Н. Моделирование пневмотранспортного потока с учетом ассиметрии поля скоростей несущей среды / М.Н. Чальцев // Современные научно-технические проблемы транспорта России: сборник материалов II международной научно-технической конференции, 28 – 30 марта 2002 г. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2002. – С. 137 – 140.

25. Чальцев М.Н. Запирающее свойство трубопроводного колена и опыт его практического использования / М.Н. Чальцев // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – 2002. – Т.1, Вып. 42. – С. 90 – 93.

26. Чальцев М. Н. Пути снижения габаритов камерных питателей пневмотранспортных систем / М.Н. Чальцев // Межрегиональная научная конференция «Современные проекты, технологии и материалы для строительного, дорожного комплексов и жилищно-коммунального хозяйства». – Брянск: Брянская гос. инженерно-технологическая академия, 2003. – С. 75 – 79.

27. Чальцев М.Н. Енергозберігаюча технологія пневматичного транспорту / М.Н. Чальцев // Проблеми економії енергії: збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003. – С.111.

28. Чальцев М.Н. Опыт снижения энергоемкости пневмотранспортных систем / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев // Матеріали II науково-практичної конференції «Донбас – 2020: наука і техніка виробництву», 03 – 04 лютого 2004р.

– Донецьк: ДонНТУ, 2004. – С. 697 – 701. *Особистий внесок: Досліджено емпіричні параметри пневмотранспортних систем.*

29. Чальцев М.Н. О моделировании пневмотранспортных потоков методами теории подобия / М.Н. Чальцев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – Вип. 83. – С. 290 – 295.

30. Чальцев М.М. Зменшення витрат енергії при пневмотранспортуванні сипучих матеріалів / М.М. Чальцев // Збірник наукових праць Міжнародної науково-технологічної конференції «Енергоефективність – 2004». (Додаток до журналу «Холодильна техніка і технологія»). – Одеса: Міжнародна академія холоду, – 2004. – С. 213–217.

31. Чальцев М.Н. Применение эжектора для сброса воздуха из малогабаритного камерного питателя / М.Н. Чальцев, С.В. Войцеховский // Весник СевГТУ. Механика, энергетика, экология. – Севастополь: СевНТУ, 2004. – Вип. 55. – С. 190 – 196. *Особистий внесок: Розроблено залежність швидкості завантаження живильника від величини протитиску у камері.*

32. Чальцев М.Н. Модель пневмотранспортного потока в изгибе трубопровода / М.Н. Чальцев // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця: ВДАУ, 2005. – № 2(8). – С. 104 – 108.

33. Чальцев М.Н. Об ограничении высоты засыпки камерного питателя при подаче сжатого воздуха в пространство над материалом/ М.Н. Чальцев // Промислова гідравліка і пневматика.– Вінниця: ВДАУ, 2005. – № 3 (9). – С. 28 – 31.

34. Чальцев М.Н. Расчет потерь давления при движении двухфазного потока в колене трубопровода в системах пневмотранспорта / М.Н. Чальцев, С.В. Войцеховский // Вісник Хмельницького національного університету (Вісник Технологічного університету Поділля). Технічні науки. Том 1: науковий журнал. – Хмельницький, 2005. – №6.– С.170 – 174. *Особистий внесок: Отримано рівняння залежності швидкості сипкого матеріалу від радіусу вигину коліна трубопроводу.*

35. Чальцев М.Н. Об уточнении гидравлических расчетов аэродинамических потоков пылевидных материалов / М.Н. Чальцев // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник / АДІ ДонНТУ. – Горлівка, 2005. – №1. – С.11 – 16.

36. Чальцев М.Н. Расчет удельных потерь давления при пневматическом транспортировании мелкодисперсных материалов / М.Н. Чальцев // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник / АДІ ДонНТУ. – Горлівка, 2006. – №1(2).– С. 54 – 58.

37. Чальцев М.Н. Определение коэффициента потерь на трение по длине трубопровода в системах пневмотранспорта / М.Н. Чальцев, С.В. Войцеховский // Донбасс-2020: наука і техніка-виробництво: матеріали III науково-практичної конференції, м. Донецьк: ДонНТУ, 2006. – С. 550 – 554. *Особистий внесок: Одержано рівняння залежності втрат тиску від концентрації суміші.*

38. Чальцев М.Н. Определение потерь давления при движении двухфазного закрученного потока в горизонтальном трубопроводе/ М.Н. Чальцев, С.В. Войцеховский. – Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: науковий журнал. – Луганськ, 2007. – №3 (109). Ч. 2.–

С. 196 – 203. *Особистий внесок: Отримано аналітичну залежність для знаходження коефіцієнта втрат на тертя, як функції параметру крутки.*

39. Чальцев М.Н. Опыт совершенствования пневмотранспортных систем на энергетических предприятиях Донбасса / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев // Донбас – 2020: перспективи розвитку очима молодих вчених: матеріали V науково-практичної конференції, м. Донецьк, 25 – 27 травня 2010 р. – Донецьк : ДонНТУ Міністерства освіти і науки, 2010. – С. 300 – 304. *Особистий внесок: Проаналізовано досвід впровадження пневмотранспортних систем на теплових електростанціях Донбасу.*

40. А.с. 992361 СССР, МКИ В 65G53/40, F26B5/04. Запорный орган для патрубков камерного питателя / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев, Э.Н. Меликов, и др. – (СССР). – № 3005902/27-11; заявл. 21.11.80; опубл. 30.01.83, Бюл. № 4. *Особистий внесок: Розроблено пристрій еластичного затвору для перекривання потоку сипкого матеріалу.*

41. А.с. 1216099 СССР, МКИ В65G53/46. Пневмозатвор камерного питателя / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев, В.И. Бабенышев, Е.В. Павлов. – (СССР). – № 3820068/27-11; заявл. 06.12.84; опубл. 07.03.86, Бюл. № 9. *Особистий внесок: Розроблено конструкцію швидкодійного приводу затвора.*

42. А.с. 1416403 СССР, МКИ⁴ В65G53/40. Устройство для загрузки сыпучего материала в пневмотранспортную установку / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев, Л.М. Португальский, В.В. Бражников (СССР). – № 4183987/24 – 11; заявл. 23.01.87; опубл. 15.08.88, Бюл. № 30. *Особистий внесок: Запропоновано вузол управління затвором живильника.*

43. А.с. 1507701 СССР, МКИ⁴ В65G53/40. Камерный питатель для транспортирования сыпучего материала / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев, Л.М. Португальский, А.М. Ворона, Е.В. Кондренко (СССР). – № 4190122/31-11; заявл. 02.02.87; опубл. 15.09.89, Бюл. № 34. *Особистий внесок: Розроблено конструкцію вузла аерації сипкого матеріалу для камерного живильника.*

44. А.с. 1523809 СССР, МКИ⁴ F16J15/00. Способ уплотнения / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев, В.И. Бабенышев, Е.В. Павлов (СССР). – № 4318076/31-29; заявл. 19.10.87; опубл. 23.11.89, Бюл. № 43. *Особистий внесок: Розроблено геометрію ущільнювальної поверхні затвору.*

45. А.с. 1537629 СССР, МКИ⁴ В65G53/40. Камерный питатель для сыпучих материалов / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев, В.И. Бабенышев, Е.В. Павлов (СССР). – 4398750/31-11; заявл. 29.03.88; опубл. 23.01.90, Бюл. № 3. *Особистий внесок: Розроблено швидкодійний пристрій блоку вантажних затворів.*

46. А.с. 1668257 СССР, МКИ⁴ В65G53/40. Питатель для пневматической подачи сыпучего материала / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев, В.Н. Павлюченко, В.А. Педос (СССР). – № 4739026/11; заявл. 19.09.89; опубл. 07.09.91, Бюл. №29. *Особистий внесок: Запропоновано конструкцію блока вантажних затворів.*

47. А.с. 1729966 СССР, МКИ В65G 53/40. Питатель для пневматического транспортирования сыпучего материала / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев, Е.В. Павлов, Г.Г. Вовк (СССР). – 4837420/11; заявл. 23.04.90; опубл. 30.04.92, Бюл. №16. *Особистий внесок: Запропоновано вузол вивантаження для малогабаритного камерного живильника.*

48. Пат. 19898 UA Україна МПК В65G 53/04. Постачальник для пневматического транспортирования сыпучего материала / Чальцев М.М., Є.В. Павлов,

Бугайов Б.Є., Г.Г. Вовк. – 4837420/SU; заявл. 23.04.90; опубл. 25.12.97, Бюл. № 6. *Особистий внесок: Запропоновано пристрій ежекторної камери з тангенціальним підводом стисненого повітря.*

49. Чальцев М.М. Дослідження закрученого двофазного потоку при транспортуванні сипучого матеріалу / М.М. Чальцев // Вісник Національного транспортного університету та Транспортної академії України. – К., 2002. – Вип. 6. – С. 165 – 170.

50. Чальцев М.Н. Методика прогнозування грядового режиму пневмотранспортування твердих дисперсних матеріалів в горизонтальній трубі / М.Н. Чальцев // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2003. – №13 (59). – С. 81 – 86.

АНОТАЦІЯ

Чальцев М.М. Розвиток теоретичних основ аеродинамічного розрахунку та проектування пневмотранспортних систем. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.12 – промисловий транспорт. – Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Луганськ, 2012.

Розвинуто теоретичні основи аеродинамічного розрахунку пневмотранспортних систем і створено уточнені методи інженерних розрахунків, які забезпечують надійний аналіз і вибір оптимальних режимів роботи обладнання, зниження енергетичних витрат на транспортування сипких вантажів по трубопроводах.

Складено рівняння нерозривності, балансу енергії для аеродисперсних потоків повітря – тверді частки, та гідравлічних опорів, які є теоретичною основою для створення уточнених методик аеродинамічного розрахунку пневмотранспортних трубопроводів.

Розроблено методику, алгоритм і програмне забезпечення аеродинамічного розрахунку пневмотранспортних трубопроводів.

Розроблено методику розрахунку втрат тиску на повороті аеродисперсного потоку, що враховує зв'язок між характеристиками потоку і параметрами коліна.

Розроблено нові типи живильника пневмотранспортних систем – малогабаритні камерні живильники, які пройшли промислову перевірку на теплових електростанціях та підприємствах будівельної індустрії.

Результати дисертаційної роботи дозволили отримати реальний річний економічний ефект на один МКЖ – 400000 грн. Очікуваний річний економічний ефект на 10 МКЖ становить 4 млн. грн.

Ключові слова: пневматичний транспорт, сипкі матеріали, трубопровід транспортний, камерний живильник, втрати тиску, критична швидкість, методи розрахунку.

АННОТАЦИЯ

Чальцев М.Н. Развитие теоретических основ аэродинамического расчета и проектирования пневмотранспортных систем. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.12 – промышленный транспорт. – Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск, 2012.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической проблемы разработки теоретических основ аэродинамического расчета пневмотранспортных систем и создания на этой базе уточненных методов инженерных расчетов, которые обеспечивают надежный анализ и выбор оптимальных режимов работы оборудования, снижения энергетических затрат на транспортирование сыпучих грузов по трубопроводам.

По результатам фундаментальных исследований аэродисперсных потоков, выполненных в АДИ ГВУЗ «ДонНТУ», впервые составлены уравнения неразрывности, баланса энергии для аэродисперсных потоков воздух – твердые частицы и гидравлических сопротивлений, которые являются теоретической основой для создания уточненных методик аэродинамического расчета пневмотранспортных трубопроводов.

Разработаны методы расчета интегральных параметров ПТС, в том числе критических скоростей и перепада давления в прямолинейном трубопроводе.

Разработаны методика, алгоритм и программное обеспечение аэродинамического расчета пневмотранспортных трубопроводов. Программа обеспечивает реализацию на ЭВМ расчетов трубопроводов любой конфигурации, в том числе и с учетом сжимаемости несущей фазы (воздуха), что невозможно выполнить без программного обеспечения. Точность расчетов подтверждена опытно, а также данными экспериментальных исследований как собственных, так и других авторов.

Проверочные расчеты, выполненные по основным положениям теории, показывают хорошую сходимость с экспериментальными данными. Погрешность расчетов не превышает 10%.

Разработана методика расчета потерь давления на повороте аэродисперсного потока, учитывающая связи между характеристиками потока и параметрами колена, которая обеспечивает хорошее совпадение расчетов с экспериментальными данными и предназначена для практического использования в расчетах и при проектировании пневмотранспортных систем.

Разработан новый тип питателя пневмотранспортных систем – малогабаритный камерный питатель. От действующих аналогов он отличается не только габаритами, но и способом управления, который заключается в том, что с помощью датчика уровня задается такая высота засыпки, для выгрузки которой необходимо давление в камере питателя, минимально превышающее потери давления в трубопроводе при установившемся режиме транспортирования. Такой способ транспортирования обеспечивает снижение энергетических затрат и стабильный режим работы ПТС. Изобретение подтверждено патентом Украины № 45804 Способ пневматического транспортирования мелкофракционных сыпучих материалов / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев.

На универсальном экспериментальном стенде АДИ ГВУЗ «ДонНТУ» проведены исследования аэродисперсных потоков в условиях пневмотранспорта. Опытным путем определены потери давления в транспортном трубопроводе на участке разгона, в режиме установившегося движения, на поворотах потока при различных скоростях и расходах транспортируемого материала. Установлено, что основная доля гидравлических потерь при повороте пневмотрассы на 90^0 проявляется на следующем за поворотом прямолинейном участке и связана с ускорением заторможенных при повороте твердых частиц. В этом случае гидравлические

сопротивления на участках разгона и на поворотах потока имеют общую природу.

Разработаны и прошли промышленную проверку образцы малогабаритных камерных питателей на тепловых электростанциях и предприятиях строительной индустрии.

На Славянской ТЭС принято решение о постепенной замене пневмовинтовых насосов на камерные конструкции АДИ ГВУЗ «ДонНТУ». В 2012 году подлежит изготовлению и установке 14 модернизированных малогабаритных камерных насосов.

Результаты диссертационной работы позволили получить реальный годовой экономический эффект на один МКП – 400000 грн. Ожидаемый годовой экономический эффект на 10 МКП составляет 4 млн. грн.

Ключевые слова: пневматический транспорт, сыпучие материалы, трубопровод транспортный, камерный питатель, потери давления, критическая скорость, методы расчета.

ABSTRACT

Chaltsev M.M. Development of estimated aerodynamic theory and design of pneumatic conveying systems . – On the rights of the manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences on speciality 05.22.12 – Industrial Transport. – East-Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl, Lugansk, 2012.

The estimated aerodynamic theory of pneumatic conveying systems is developed and the adjusted methods of engineering calculations are created providing robust analysis and selection of optimal operation modes, reduction of energy expenditure on bulk cargo piping.

Being the base of improved methods of estimated aerodynamic of air tube conveyer the continuity equation, energy balance equation for aerodisperse flows of air-solid particles as well as the equation of hydraulic resistance are worked out.

The method, algorithm and software of hydraulic calculation of pneumatic conveying pipelines are also worked out.

The design procedure of pressure loss at aerodisperse flow turn is worked out considering the connection between flow properties and bend parameters.

New models of PCS feeder that is small-sized chamber feeders are designed and passed the industrial testing at thermal plants and enterprises of industrial engineering. The dissertation results provided a real annual economic effect on one small-sized chamber feeder of 400 000 UAH. The expected annual economic effect on 10 small-sized chamber feeders makes 4 million UAH.

Keywords: pneumatic conveying, bulk material, conveying line, blow tank, pressure loss, critical velocity, calculation methods.

ЧАЛЬЦЕВ МИХАЙЛО МИКОЛАЙОВИЧ

РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ
АЕРОДИНАМІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ
ПНЕВМОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

Спеціальність 05.22.12 – промисловий транспорт

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук

Підписано до друку 17.04.2012 р. Формат 70×90/16. Гарнітура Times New
Тираж 100 прим. Умов. друк. арк. 1,9. Зам. № 105.

Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
Автомобільно-дорожній інститут
84646, м. Горлівка, вул. Кірова, 51
Редакційно-видавничий відділ
E-mail: druknf@ Rambler.ru

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовників і
розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 2982 від 21.09.2007 р.