

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЛЯПОЩЕНКО ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 66.074.1:547.912

**ГІДРОДИНАМІКА ІНЕРЦІЙНО-ФІЛЬТРУЮЧИХ
СЕПАРАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ ОЧИЩЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник — доктор технічних наук, професор
Склабінський Всеволод Іванович,
Сумський державний університет,
завідувач кафедри процесів та обладнання
хімічних і нафтопереробних виробництв.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Півень Олександр Наумович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
професор кафедри машин та апаратів
хімічних і нафтохімічних виробництв;

кандидат технічних наук, доцент
Юхименко Микола Петрович,
Сумський національний аграрний університет,
завідувач кафедри технологічного обладнання
харчових виробництв.

Провідна установа — Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків.

Захист дисертації відбудеться “18” травня 2006 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К55.051.03 при Сумському державному університеті за адресою: 40007, Україна, м. Суми, вул. Римського - Корсакова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету (40007, Україна, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2).

Автореферат розіслано “11” квітня 2006 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Є.М. Савченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Природний газ, що надходить зі свердловин, містить значну кількість краплинної рідини, що складається з мінералізованої води, газового конденсату, метанолу й інших, як правило, у кількості 30-40 г/м³, що сягають навіть 200-800 г/м³. Застосовуване в технологічних лініях газопереробних виробництв традиційне газосепараційне обладнання відрізняється низьким ступенем розділення (ефективність розділення не перевищує 30-40%, а іноді сягає навіть 15%), що забезпечує лише грубе очищення нафтових побіжних і природних газів.

З огляду на вищесказане доцільне проведення пошуків нових способів обробки газорідинних потоків, що забезпечують високу ефективність розділення, та проектування високоефективного інерційно-фільтруючого газосепараційного устаткування, яке дозволяє вилучати вологу у вигляді конденсаційного туману. Уловлювання з газорідинного потоку конденсату, що містить цінні вуглеводневі компоненти, є перспективою його подальшої переробки і, отже, підвищення ступеня використання енергоресурсів України.

Дослідження, спрямовані на опрацювання високоефективного інерційно-фільтруючого апаратурного оформлення для інтенсифікації процесу газосепарації, визначення конфігурації та конструктивного оформлення сепараційних елементів, комплексне теоретичне й експериментальне вивчення гідродинаміки і структури газорідинних потоків, механізмів формування високодисперсної краплинної рідини у потоці природного газу та механізмів розділення, є актуальними, бо порушують одну з важливих проблем, яка стоїть перед нафтогазовою промисловістю України на сучасному етапі. Удосконалення техніки та технології очищення побіжного нафтового і природного газів є необхідною умовою якісної підготовки їх до подальшого транспортування і використання на промислових підприємствах у народному господарстві.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає тематичному плану науково-дослідних робіт ВАТ «Укрнафта» за темою „Удосконалення обладнання вузла сепарації товарного газу” (протокол НТР ВАТ «Укрнафта» №30 від 26.04.2001р.) та виконувалася згідно з пріоритетним напрямком наукової роботи Сумського державного університету „Екологічні проблеми хімічної технології, розроблення прогресивних технологій і устаткування для хімічного виробництва”. Наукові розробки впроваджені під час виконання госпдоговірних науково-дослідних робіт за темою №82.05.05.01-02/625-р „Удосконалення обладнання установки осушування газу” (замовник ВАТ «Укрнафта», Качанівський газопереробний завод).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є визначення гідродинаміки криволінійних течій по каналах інерційно-фільтруючого газосепараційного устаткування, в якому удосконалено динаміку руху газорідинного потоку, що забезпечує підвищення здатності вловлювання (запобігання вторинному унесенню, створення стабільного стікання вловленої рідини) та зниження гідравлічного опору і, отже, інтенсифікацію та підвищення питомої продуктивності й ефективності процесу сепарації високодисперсної краплинної рідини.

Для досягнення поставленої мети послідовно розв'язано такі задачі:

- проведено теоретичний аналіз механізмів формування високодисперсної краплинної рідини у потоці природного газу;
- розроблено фізичну модель з подальшим математичним моделюванням газодинаміки руху газорідинного потоку за інерційною та фільтруючою секціями газосепаратора, а також відповідних механізмів розділення, що є основою теоретичних розрахунків опору пристрою та рівнянь прогнозування фракційної ефективності сепарації і загальної ефективності сепараторів у цілому;
- досліджено формування криволінійного газорідинного потоку жалюзійними пластинами, визначено поле швидкостей, гідравлічний опір та ефективність очищення газу від високодисперсної краплинної рідини в інерційно-фільтруючому газосепараторі;
- розроблено інженерну методику конструктивного розрахунку інерційно-фільтруючого газосепараційного обладнання з надійним методом оцінки його ефективності;
- проведено дослідно-промислову апробацію та впроваджено розроблені інерційно-фільтруючі сепараційні пристрої в промислові зразки апаратів.

Об'єктом дослідження є процес сепарації високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку та газосепараційне обладнання.

Предметом дослідження є гідродинаміка інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв очищення природного газу.

Методи дослідження. Математичне моделювання здійснювалось на підставі класичних положень механіки рідини та газу і технічної гідромеханіки. Фізичний експеримент проведено шляхом експериментальних досліджень стендових моделей сепараційних пристроїв. На етапі комп'ютерного моделювання застосовано системи тривимірного твердотільного моделювання КОМПАС-3D (<http://www.ascon.ru/>) та CAD-систему SolidWorks (<http://www.solidworks.com/>), програмний продукт COSMOS FlowWorks (<http://www.cosmosm.com/>), програмні комплекси FlowVision (<http://www.flowvision.ru>) та Fluent FloWizard (<http://www.fluent.com>). Побудову теоретичних залежностей виконано диференціальними методами математичного аналізу та інтегрального обчислення.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримані такі наукові результати:

- на підставі теоретичного аналізу створених фізичної і математичної моделі руху газокраплинного потоку та за допомогою комп'ютерного моделювання розроблено умови реалізації нового способу сепарації високодисперсної краплинної рідини з використанням нових конструкцій інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв;

- проведено узагальнення математичних рівнянь, які дозволяють розраховувати гідродинамічні та сепараційні показники інерційно-фільтруючих пристроїв, з урахуванням часткового проходження газокраплинного потоку в кожному послідовно розміщеному інерційному елементі сепаратора крізь фільтруючий шар;

- за результатами експериментальних досліджень модельних та натурних зразків сепараційних пристроїв і їх узагальнення вперше отримано гідралічні та сепараційні характеристики інерційно-фільтруючих сепараторів.

Практичне значення одержаних результатів:

- на основі проведених досліджень гідродинамічних процесів розроблено методики розрахунку інерційно-фільтруючих сепараторів, що дозволяють визначити параметри процесу сепарації та основні геометричні розміри сепараційних вузлів;

- запропоновано нові, захищені деклараційними патентами України, способи сепарації та нові конструкції інерційно-фільтруючих сепараторів, що дозволяють значно підвищити ступінь сепарації;

- отримані наукові результати впроваджені у виробництво на промислових підприємствах нафтогазового комплексу України, а саме: розроблено і впроваджено у виробництво конструктивні та технологічні рішення щодо підвищення ефективності роботи контактора блока осушування газу, модернізовано жалюзійні газосепаратори дотискувальної компресорної станції IV ступеня стискання на Качанівському газопереробному заводі, сітчасті газосепаратори Глинсько-Розбишівського виробництва та нафтогазові сепаратори Анастасівської газліфтно-ї компресорної станції, що входять до складу ВАТ „Укрнафта”.

Особистий внесок здобувача У статтях, написаних у співавторстві та опублікованих у фахових виданнях, затверджених ВАК України, особистий внесок здобувача полягає в такому:

- у роботі [3] розроблено фізичну модель формування високодисперсної краплинної рідини у потоці природного газу, розглянуто основні механізми формування краплин рідкої фази як подрібнення за рахунок інерційних ефектів у турбулентному потоці газу за відсутності конденсації, процеси гетерогенної та

гомогенної конденсації, коагуляції за інерційним механізмом та механізмом турбулентної дифузії;

- у роботі [4] проведено математичне моделювання газодинаміки руху газорідного потоку за інерційною та фільтруючою секціями газосепаратора та комп'ютерне моделювання течії потоку природного газу в створеній геометричній конфігурації розрахункової області сепараційного каналу;

- у роботах [1, 2, 5] розроблено високоефективні конструкції сепараційних вузлів, запропоновано достатньо надійний метод оцінки їх ефективності та підтверджено його адекватність, здійснено авторський нагляд за роботою дослідно-промислових зразків, проведено порівняльну оцінку стандартних та модернізованих газосепараторів.

У співавторстві винайдено та захищено деклараційними патентами України [6, 7] нові способи та пристрої.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 4-й Міжнародній науково-практичній конференції „Проблеми економії енергії” у Національному університеті „Львівська політехніка” (м. Львів, 2003 р.), на Міжнародній науково-практичній конференції „Екологія. Енергосбереження. Економіка” (м. Суми, 2003 р.), на XIII Міжнародній науково-технічній конференції з компресоробудування „Компрессорная техника и пневматика в XXI веке” (м. Суми, 2004р.), на XXI науковій конференції країн СНД „Дисперсные системы” у Одеському національному університеті ім. І.І.Мечникова (м. Одеса, 2004 р.), на VIII Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених „Технологія-2005” у Сєверодонецькому технологічному інституті Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля (м. Сєверодонецьк, 2005 р.), на XI Міжнародній науково-технічній конференції „Герметичність, вібронадійність та екологічна безпека насосного і компресорного обладнання — ГЕРВІКОН - 2005” (м. Суми, 2005 р.), на науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів Сумського державного університету (м. Суми, 2003, 2004, 2005 рр.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у 9 наукових працях, з них 5 статей у наукових журналах, 2 публікації тез доповідей у матеріалах та працях конференцій, 5 з них у наукових фахових виданнях, затверджених ВАК України. Отримано 2 деклараційних патенти на винахід України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 129 найменувань, додатків. Повний обсяг дисертації становить 135 сторінок, серед яких 131 сторінка основного тексту, 2 таблиці, 62 ілюстрації.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень, зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета та задачі досліджень, їх наукова новизна та практичне значення, наведено основні дані щодо апробації роботи, публікацій, подано загальну характеристику роботи.

У першому розділі на основі проведеного патентного пошуку і огляду літературних джерел проаналізовано сучасний стан та шляхи розвитку техніки та технології газоочищення. Розглянуто класифікацію сепараторів за основними функціональними та конструктивними ознаками, з якої виявлено відсутність перехідного виду сепараторів від інерційного до фільтруючого типів.

Незаперечними перевагами інерційних газосепараторів і краплевловлювачів є надійність в роботі, низький гідравлічний опір, значна питома продуктивність та ефективне уловлювання твердих частинок та краплин рідини. Але при досягненні високоінтенсивних гідродинамічних режимів руху газорідинного потоку по інерційних сепараційних елементах спостерігаються вторинні процеси (руйнування структури плівки вловленої рідини та бризкоунесення). Основний недолік інерційних краплевловлювачів — придатність до ефективного уловлювання порівняно грубодисперсних краплин (розміром $2R \geq 10$ мкм) та можливість роботи з високими техніко-економічними показниками у вузькому діапазоні навантажень по газовій фазі.

Застосування фільтр-сепараторів та тумановловлювачів дає можливість вловлювання високодисперсної фракції двофазного потоку за рахунок застосування механізмів фільтрування, але при цьому значно зростає гідравлічний опір сепараційних пристроїв, які задовільно працюють лише в режимі самоочищення від вловленої краплинної рідини.

На підставі розглянутих способів підвищення ефективності сепараційних пристроїв виявлено доцільність комплексного поєднання переваг інерційних краплевловлювачів та фільтруючих тумановловлювачів, взаємно виключаючи недоліки, характерні для кожного класу сепараторів. У результаті доведено актуальність теми досліджень, визначено мету роботи та поставлено задачу запропонувати нові способи вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку, які б поєднували переваги інерційного та фільтруючого механізмів процесу сепарації, вдосконалити динаміку руху газорідинного потоку, поліпшити умови відведення вловленої рідини (створення стабільного стікання вловленої рідини, запобігання вторинному унесенню), отримати розрахункові залежності для визначення основних гідродинамічних та сепараційних характеристик пропонованих інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв.

У другому розділі проведено математичне моделювання газодинаміки руху газорідного потоку та розрахунків ефективності жалюзійних інерційно-фільтруючих сепараторів.

Відзначено, що основними механізмами формування крапель у турбулентному потоці газу за відсутності конденсації є процеси подрібнення та коагуляції, які відбуваються одночасно. Встановлений визначений розподіл крапель за розмірами має вигляд логарифмічно нормального розподілу (рис.1):

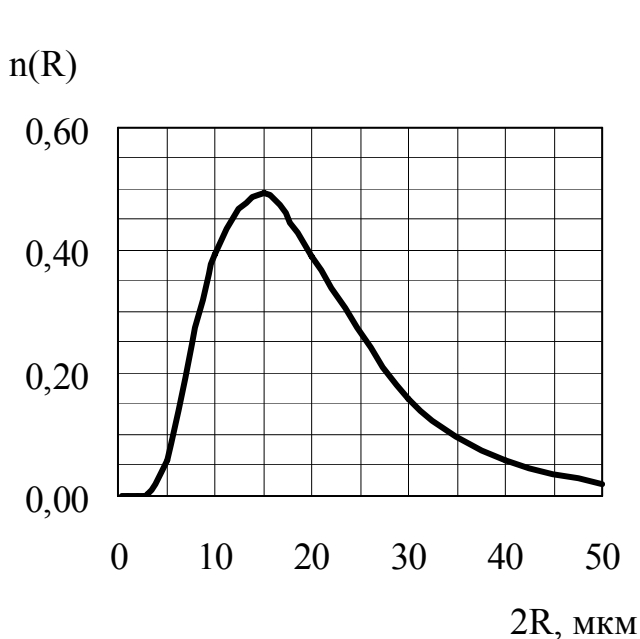


Рис. 1. Функція щільності розподілу дисперсного складу крапель конденсації та пароподібної вологи у потоці природного газу

$$n(R) = \frac{n_* R_1}{\sigma_1 R} \exp\left(-\frac{\ln^2(R/R_1)}{2\sigma_1^2}\right), \quad (1)$$

$$n_* = 3C_w \exp(-2,5\sigma_1^2) / 4\pi\sqrt{2\pi}R_c^4, \quad (2)$$

$$R_1 = R_c \exp(-0,5\sigma_1^2), \quad (3)$$

де R – радіус краплі, м; $n(R)$ – щільність імовірності випадкової величини R ; C_w – об'ємний вміст рідкої фази, $\text{м}^3/\text{м}^3$; R_c – середній радіус крапель, м; σ_1^2 – дисперсія розподілу.

Відомо, що краплі в потоці газу подрібнюються, якщо їх радіус перевищує деякий критичний. Краплі радіусом менше критичного можуть тільки коагулювати. Виходячи з умов рівноваги краплі, отримано вираз для оцінки критичного радіуса краплі $R_{\text{кр}}$:

$$R_{\text{кр}} = d_3 \zeta_f^{-3/5} We^{-3/5} \left(\frac{\rho_r}{\rho_c}\right)^{2/5}, \quad (4)$$

де d_3 – діаметр трубопроводу, м; ζ_f – коефіцієнт опору обтіканню частинки газовим потоком; We – число Вебера; ρ_r та ρ_c – густина суцільної фази та дисперсних частинок відповідно, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Математичне моделювання газодинаміки руху газорідного потоку по інерційній та фільтруючій секціях сепараційного пристрою побудовано з урахуванням прийнятих таких припущень:

- робочий об'єм сепараційного каналу умовно розбитий на три зони (прямота криволінійні ділянки каналу, фільтруючий елемент) (рис.2), сепарація на яких здійснюється за різними механізмами;
- дисперсний склад газорідного потоку на вході в канал інерційно-фільтруючого пристрою підлягає логнормальному закону розподілу.

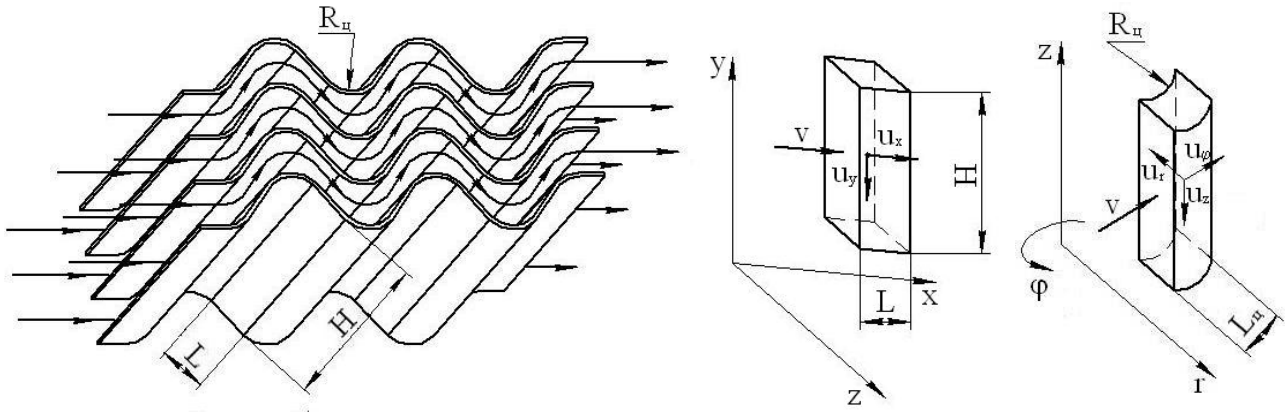


Рис. 2. Схема руху газорідного потоку в інерційній секції сепаратора по сепараційних каналах

Траєкторія руху краплі на прямолінійних ділянках сепараційного каналу в системі координат (x, y) :

$$\left(\frac{4\pi R^3 \rho_q}{3}\right) \frac{du_x}{dt} = \frac{f \rho_r \pi R^2 |\vec{w}| (v - u_x)}{2},$$

$$\left(\frac{4\pi R^3 \rho_q}{3}\right) \frac{du_y}{dt} = \frac{4\pi R^3 \Delta \rho g}{3} - \frac{f \rho_r \pi R^2 |\vec{w}| u_y}{2}.$$
(5)

де u_x, u_y – складові швидкості краплі, м/с; f – коефіцієнт, що залежить від числа Рейнольдса Re потоку газу, що обтікає краплю; v – абсолютна швидкість газового потоку, м/с; w – швидкість пересування краплі відносно газового потоку, м/с.

$$\vec{w} = (v - u_x, u_y), \quad u_x = dx/dt \quad \text{та} \quad u_y = dy/dt.$$

Розв'язуючи рівняння (5) (за умов $x=0, dx/dt=v, y=y_0, dy/dt=0$ за $t=0$), отримуємо траєкторію руху крапель радіуса R , що знаходиться у вхідному перетині у точці $y=y_0$. Перебираючи всі значення y_0 і R , та обравши з усіх траєкторій лише ту, що починається та закінчується у точках з координатами $(0, H)$ та $(L, 0)$, знайдено мінімальний розмір крапель, що осаджуються у сепараторі.

Послідовними спрощеннями отримано залежність для швидкості осадження краплі u_y , м/с, радіусом R та мінімальний радіус крапель R_m , м, за умови, що вони осаджуються зі стоксовою швидкістю:

$$u_y = \frac{\mu_r Ar}{2R \rho_r (18 + 0,575 Ar^{0,5})},$$
(6)

$$R_m = \left(\frac{9vH\mu_r}{2\Delta\rho gL}\right)^{0,5},$$
(7)

де μ_r – коефіцієнт динамічної в'язкості газового потоку, Па·с; Ar – критерій Архімеда.

Коефіцієнт ефективності сепарації η :

$$\eta = 1 - \int_0^{R_m} \int_{y_0}^H \frac{4}{3C_w} \pi R^3 n_0(R) dR, \quad (8)$$

та з урахуванням логнормального закону розподілу крапель (1) на вході до сепаратора

$$\eta = \frac{\exp(-3\sigma_1^2)}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} \int_0^{R_m} R^2 \left(1 - \frac{y_0}{H}\right) \exp\left(-\frac{\ln^2(R/R_1)}{2\sigma_1^2}\right) dR. \quad (9)$$

Рівняння руху краплі на криволінійних ділянках сепараційного каналу:

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{\text{ч}} \frac{du_z}{dt} &= -\frac{4}{3} \pi R^3 \Delta \rho g - 6\pi \mu_r R (u_{\varphi} - v_{\varphi}), \\ \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{\text{ч}} \frac{du_r}{dt} &= -6\pi \mu_r R u_r + \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{\text{ч}} \frac{u_{\varphi}^2}{r}, \\ \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{\text{ч}} \left(\frac{du_{\varphi}}{dt} + \frac{u_r u_{\varphi}}{r}\right) &= -6\pi \mu_r R (u_{\varphi} - v_{\varphi}). \end{aligned} \quad (10)$$

Траєкторії руху краплі на криволінійній ділянці сепараційного каналу інерційно-фільтруючого елемента визначаються з рівняння руху:

$$\begin{aligned} dz/dt &= v_{\varphi} - u_{\text{oc}}; & dr/dt &= 2\rho_{\text{ч}} R^2 v_{\varphi}^2 / 9\mu_r r; \\ z(0) &= 0; & r(0) &= r_0; \\ u_{\text{oc}} &= 2\Delta \rho g R^2 / 9\mu_r. \end{aligned} \quad (11)$$

Коефіцієнт ефективності сепарації на розглянутій криволінійній ділянці сепараційного каналу η :

$$\eta = 1 - \frac{4\pi}{3C_w} \int_0^{R_m} R^3 n_0(R) \frac{r_0^2}{R_{\text{ц}}^2} dr. \quad (12)$$

Розглядаючи рух газорідної суміші крізь фільтруючий елемент (металева сітка), урахується аналогія осадження крапель на волокнах осадженню крапель однакового розміру на струнах (циліндрах) діаметром $2R_{\text{в}}$, що розміщені на відстані $L_{\text{в}}$. За припущення, що краплі досить малі, так, що для визначення сили опору можна скористатися формулою Стокса, траєкторії руху краплі визначаються рівнянням

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{\text{ч}} \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = 6\pi \mu_r R \left(\vec{u} - \frac{d\vec{r}}{dt} \right), \quad (13)$$

де \vec{r} – радіус-вектор краплі, м.

Структуру волокнистого полотна можна характеризувати часткою вільного об'єму ε , $\text{м}^3/\text{м}^3$, середнім розміром пор $L_{\text{в}}$, м, та діаметром волокон $d_{\text{в}}$, м, моделюючи шар фільтруючого елемента товщиною V , м, N плоскими паралельними шарами сітки, відстань між якими h , м.

Критична товщина плівки стічної рідини $h_{кр}$, м, відстань $x_{кр}$, м, від верхньої основи струни, та критична швидкість $u_{кр}$, м/с, за яких можливий зрив плівки газовим потоком:

$$h_{кр} = \frac{\sigma}{\rho_r u^2} \left(1 + \left(1 + \frac{2\pi\rho_r R_b \mu_c u^3}{\sigma^2} \right)^{1/2} \right), \quad (14)$$

$$x_{кр} = \frac{\rho_c g R_b}{3\mu_c u C_w b} \left(\frac{\sigma}{\rho_r u^2} \right)^3 \left(1 + \left(1 + \frac{2\pi\rho_r R_b \mu_c u^3}{\sigma^2} \right)^{1/2} \right)^3, \quad (15)$$

$$u_{кр} = \frac{0,0625\pi\varepsilon d_b^2 \sigma^{6/19} \rho_r^{2/19}}{L_b^2 (1-\varepsilon) \rho_c^{8/19}} \left(\frac{\Delta\rho g}{\mu_r} \right)^{7/19} \left(\frac{\varepsilon d_b}{1-\varepsilon} \right)^{8/19}, \quad (16)$$

де μ_c – коефіцієнт динамічної в'язкості дисперсних частинок, Па·с; σ – поверхневий натяг крапель рідини, Н/м; b – відстань від центральної лінії потоку до критичної траєкторії, м.

У третьому розділі висвітлені результати експериментальних досліджень гідродинамічних та сепараційних показників стендових моделей інерційно-фільтруючих крапле- та тумановловлювачів на експериментальній установці.

Після проведення серії дослідів ($Q=0,015-0,540$ м³/с, $4000 \leq Re \leq 40500$) результати експериментальних досліджень полів швидкостей течії газового потоку по інерційній зоні сепараційного каналу краплевловлювача (рис.3 а) та результати розрахунків значень локальних швидкостей відображено графічно лініями рівних швидкостей $|\vec{v}| = \text{const}$ (ізотахи) (рис.4).

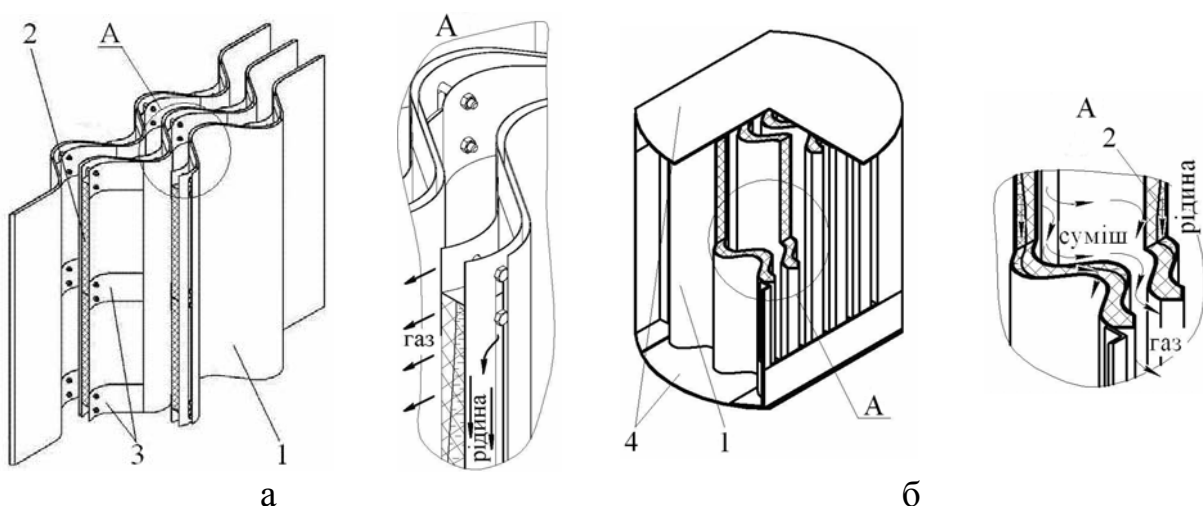


Рис. 3. Моделі інерційно-фільтруючих крапле- (а) та тумановловлювачів (б):

1 - подвійні жалюзі; 2 - фільтруючий елемент; 3 - жолоби; 4 - сегментні тарілки

При розвинутій турбулентній течії потоку ($Re \geq 10000$) виявлено збіль-

шення більш ніж у два рази локальних швидкостей газового потоку поблизу виступів криволінійних ділянок стінок каналу (при $\theta=70^0$), що є зонами потенційного диспергування плівки вловленої рідини та вторинного бризкоунесення.

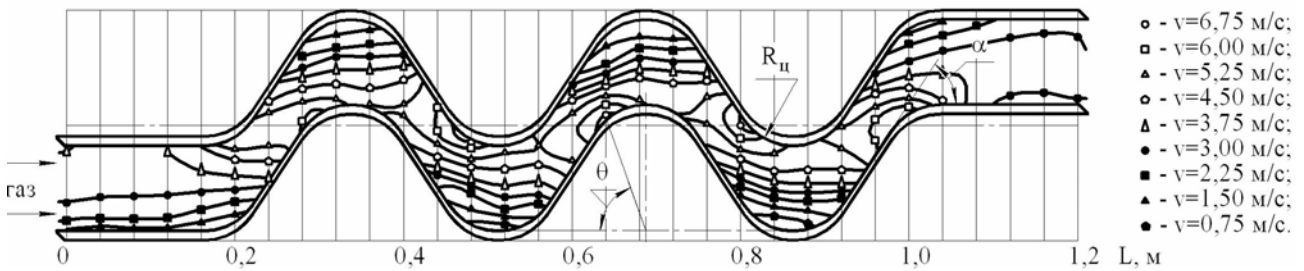


Рис. 4. Розподіл локальних швидкостей руху газового потоку по інерційній секції криволінійному каналу ($Q=0,270 \text{ м}^3/\text{с}$, $Re=40500$).

Визначено геометричні зони доцільного розміщення фільтруючих елементів у місцях западин упритул до стінок жалюзі інерційно-фільтруючого краплевловлювача, де локальні швидкості сягають мінімальних, з іншого боку обмежені ізотаксами зі значеннями швидкості, що дорівнюють швидкості газового потоку на вході у криволінійний канал, та значеннями кута $\theta=60^0-110^0$.

Зазначено, що гідравлічний опір руху двофазного потоку ΔP визначається як сума окремих складових опор, обумовленого рухом газового потоку $\Delta P_{\text{г}}$, наявністю в ньому завислих частинок (краплин) $\Delta P_{\text{ч}}$, та в другу чергу складений різними механізмами сепарації (інерційним та фільтруючим) (рис.5-8).

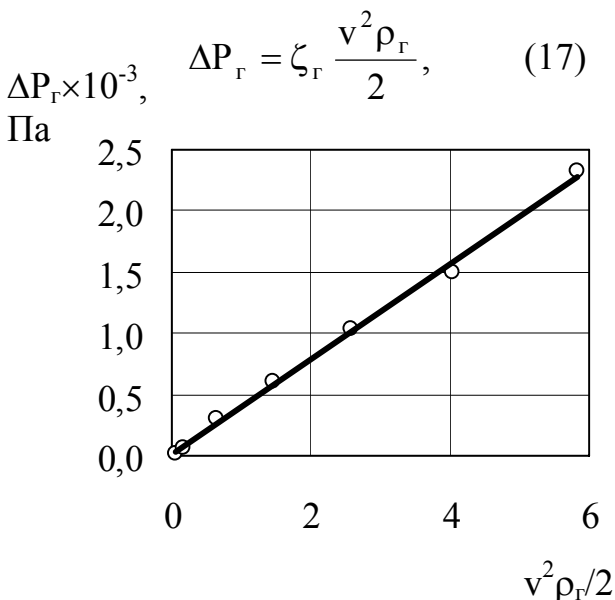


Рис. 5. Гідравлічний опір $\Delta P_{\text{г}}$ «сухої» жалюзійної секції краплевловлювача

$$(2300 \leq Re = \frac{d_{\text{э}} v_{\text{г}} \rho_{\text{г}}}{\mu_{\text{г}}} \leq 100000)$$

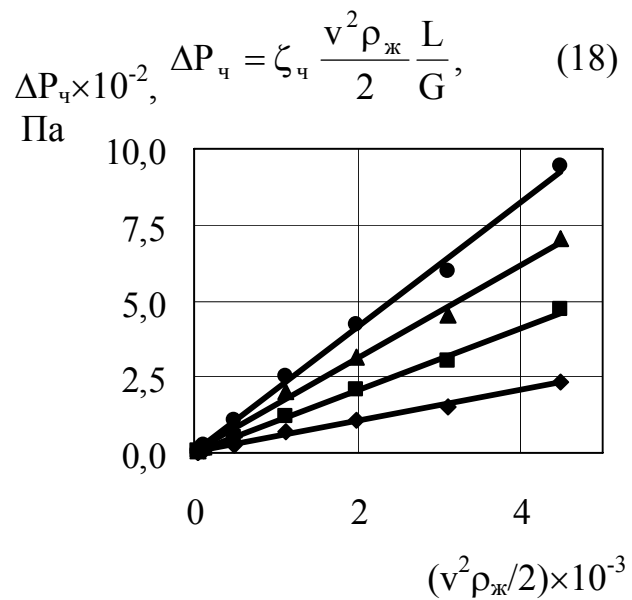


Рис. 6. Залежність гідравлічного опору $\Delta P_{\text{ч}}$ від питомої витрати рідини:

- ◆ - $L/G=0,05$; ■ - $L/G=0,10$;
- ▲ - $L/G=0,15$; ● - $L/G=0,20$

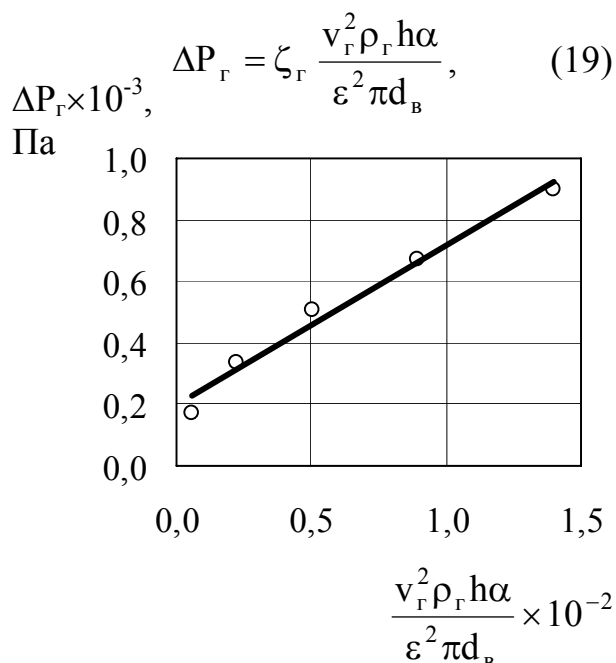


Рис. 7. Гідравлічний опір ΔP_r «сухої» фільтруючої секції тумановловлювача ($Re = \frac{d_b v_r \rho_r}{\mu_r} > 5$)

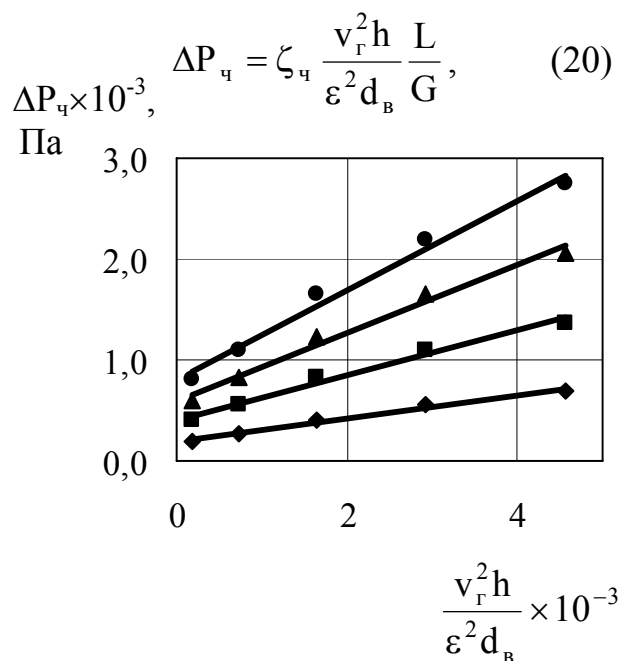


Рис. 8. Залежність гідравлічного опору ΔP_q від питомої витрати рідини:
 ◆ - $L/G=0,05$; ■ - $L/G=0,10$;
 ▲ - $L/G=0,15$; ● - $L/G=0,20$

Експериментальні дослідження загальної ефективності η очищення газу при різних навантаженнях по газу та співвідношенні рідинної та газової фаз (L/G) проведено з застосуванням методу фізичної аналогії. Як аналог запропоновано використовувати значення гідродинамічного опору ΔP , обумовленого рухом газового потоку крізь модель сепараційного пристрою (рис.9):

$$\eta = 0,142 \times \ln(\Delta P \times 10^2), \quad (21)$$

$$\eta = 0,079 \times \ln(\Delta P \times 10^3), \quad (22)$$

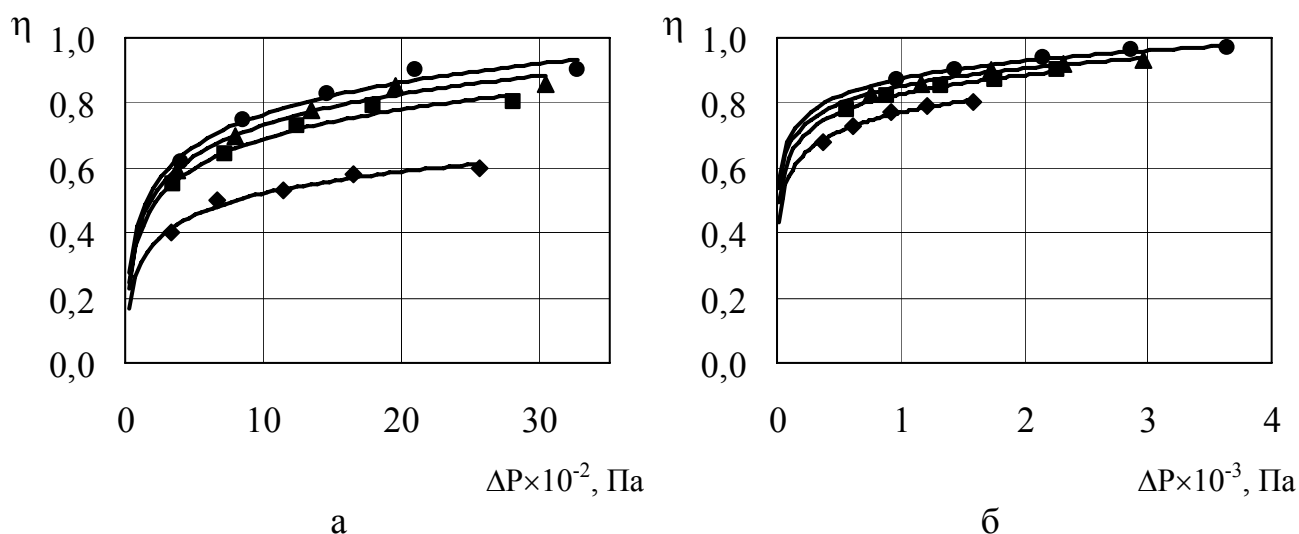


Рис. 9. Залежність ефективності вловлювання η від гідравлічного опору ΔP інерційно-фільтруючого краплевловлювача (а) та тумановловлювача (б):

◆ - $L/G=0,05$; ■ - $L/G=0,10$; ▲ - $L/G=0,15$; ● - $L/G=0,20$

Адекватність поширення отриманих розрахункових залежностей для визначення гідравлічного опору (17)-(20) та ефективності вловлювання (21)-(22) інерційно-фільтруючих газосепараційних пристроїв обмежується областю перехідного та турбулентного гідродинамічних режимів руху газового потоку ($2300 \leq Re \leq 100000$, $v=0,3-5,0$ м/с) та початковим вологовмістом $C_w \leq 200$ г/м³.

У четвертому розділі проведено комп'ютерне моделювання тривимірних течій двофазного газового потоку з високодисперсною у ньому краплинною рідиною по 3D геометричних моделях газосепараційних елементів з метою візуалізації цих течій методами комп'ютерної графіки.

Завдання розв'язувалось для розвиненої турбулентної течії, у якому вирішуються тільки рівняння Нав'є-Стокса для нестисливої рідини та рівняння переносу для турбулентної енергії і дисипації.

Рівняння Нав'є-Стокса:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla(v \otimes v) = -\frac{\Delta p}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla \left((\mu + \mu_t) (\nabla v + (\nabla v)^T) \right) + S, \quad (23)$$

$$\nabla v = 0, \quad (24)$$

де v – вектор відносної швидкості, м/с; t – час, с; p – відносний тиск, Па; ρ – густина, кг/м³; μ та μ_t – динамічна та турбулентна в'язкість, кг/(м·с); T – відносна температура, К; S – джерело.

Рівняння енергії:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(vh) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho}, \quad (25)$$

де h – ентальпія, м²/с²; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); C_p – питома теплоємність, Дж/(кг·К); Pr_t – турбулентне число Прандтля; Q – джерело тепла анізотропного фільтра опору, Вт/м³.

Динаміка дисперсних частинок:

$$\frac{dx_q}{dt} = v_q, \quad (26)$$

$$\frac{dv_q}{dt} = \frac{\pi d_q^2}{8m} \zeta_f \rho |w| w + g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_q} \right) - \frac{\bar{\nabla} p}{\rho_q}, \quad (27)$$

де x_q – положення частинки (вектор), м; d_q – діаметр частинки, м; m – маса частинки, кг; ζ_f – коефіцієнт опору; w – швидкість частинки відносно несучої фази, м/с.

Розрахункова область сепараційного каналу жалюзійного інерційно-фільтруючого газосепараційного пристрою представлена рівномірною сіткою 30x15x10 осередків. Граничні умови задано на поверхнях сепараційного каналу жалюзійного інерційно-фільтруючого газосепараційного пристрою.

Змодельовані тривимірні течії потоку природного газу з високодисперсною у ньому краплинною рідиною по криволінійному сепараційному каналу жалюзійного газосепаратора візуалізовано методами комп'ютерної графіки у вигляді шарів перетину вздовж руху потоку з заливками за значеннями тиску, модуля швидкості, ізоліній складових швидкості (рис.10), а також анімаційного зображення спалахів траєкторій руху частинок потоку по об'єму зазначених об'єктів.

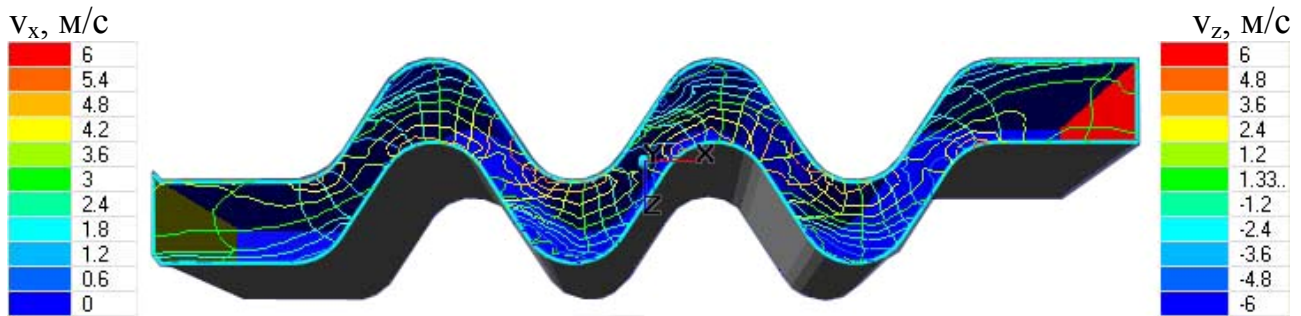


Рис. 10. Ізолінії складових v_x , м/с, та v_z , м/с, локальних швидкостей руху потоку природного газу по криволінійному сепараційному каналу жалюзійного газосепаратора (при $v=3,0$ м/с)

У п'ятому розділі проведено аналіз розрахунково-теоретичних залежностей, отриманих при математичному моделюванні газодинаміки руху газорідного потоку по інерційній та фільтруючій секціях жалюзійного сепаратора, експериментальному дослідженні стендових моделей жалюзійних інерційно-фільтруючих крапле- та тумановловлювачів та комп'ютерному моделюванні течії потоку природного газу по віртуальних моделях газосепараційних елементів.

Розроблено методику розрахунку параметрів процесу в інерційно-фільтруючих сепараторах та інженерну методику розрахунку інерційно-фільтруючих сепараторів в умовах сепарації високодисперсної краплинної рідини з потоку природного газу. Складено алгоритм та програму розрахунку на ЕОМ з оцінки ефективності роботи інерційно-фільтруючого тумановловлювача та визначення розмірів максимально проникаючих частинок дисперсної фази.

Винайдено умови реалізації нових способів сепарації високодисперсної краплинної рідини з використанням нових конструкцій інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв, які захищено деклараційними патентами України.

У 2001-2003 рр. під час виконання госпдоговірних науково-дослідних робіт за темою „Удосконалення обладнання установки осушування газу” (замовник ВАТ «Укрнафта») пройшли промислові випробування та впроваджено на підприємствах ВАТ «Укрнафта» високоефективні газосепаратори конструкції

СумДУ, які дозволили суттєво підвищити якість товарного газу, знизити температуру точки роси, зберегти цінну сировину, яку можна передавати на переробку та отримувати додаткові прибутки, економити діетиленгліколь (ДЕГ). У цей самий період проведено дослідження умов роботи блока осушування газу (БОГ) на Качанівському газопереробному заводі (КГПЗ), Глинсько-Розбишівському виробництві та Анастасівській газліфтній компресорній станції (АГЛКС), що входять до складу ВАТ «Укрнафта». Розроблено та впроваджено у виробництво конструктивні та технологічні рішення щодо підвищення ефективності роботи БОГ.

Промислові випробування дослідно-промислових зразків інерційно-фільтруючих газосепараційних пристроїв проведено у рамках науководослідних робіт ВАТ «Укрнафта» за темою „Удосконалення обладнання вузла сепарації товарного газу”. У застосовуваних у технологічній схемі IV ступеня стискання дотискувальної компресорної станції (ДКС) гравітаційно-інерційних жалюзійних газосепараторах С-2/1-3 проведено заміну вертикальних жалюзійних відбійників на інерційно-фільтруючі краплевловлювачі (рис.11).

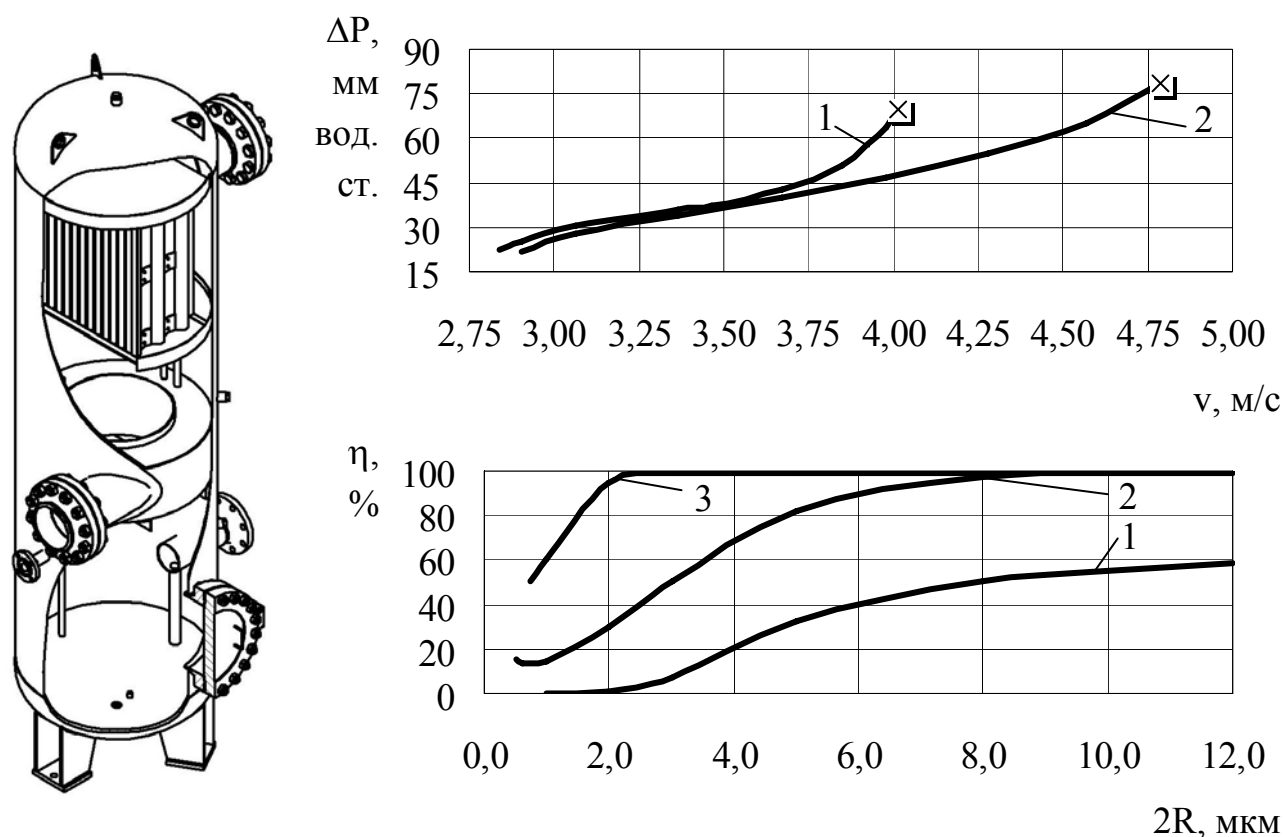


Рис. 11. Модернізований газосепаратор ГСВИ 64-1000, обладнаний:
 1 – гравітаційно-інерційним жалюзійним відбійником; 2 – інерційно-фільтруючим краплевловлювачем; 3 – інерційно-фільтруючим тумановловлювачем;
 × – критична точка інверсії фаз (захлинання фільтруючого шару)

У додатках наведені блок-схема та текст програми розрахунку з оцінки ефективності сепарації інерційно-фільтруючих тумановловлювачів, результати промислових випробувань дослідно-промислових зразків інерційно-фільтруючих газосепараторів та акти промислового впровадження наукових результатів та технологічних рекомендацій, отриманих у дисертаційній роботі.

ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу процесів сепарації мікрокраплинної вологи у газовому середовищі виявлено недоліки існуючих газосепараційних пристроїв та визначено перспективні напрямки організації руху газокраплинного потоку, що поєднує кращі переваги інерційних та фільтруючих способів сепарації з метою покращення якості газового потоку.
2. Розроблено математичну модель розрахунку гідродинамічних та сепараційних показників інерційно-фільтруючих сепараторів, в якій враховано часткове проходження газокраплинного потоку крізь фільтруючий шар у кожному інерційному елементі сепаратора, що розміщені послідовно.
3. Експериментально досліджено розподіл швидкостей руху газового потоку у модельних зразках інерційно-фільтруючих крапле- та тумановловлювачів, проведено порівняння отриманих результатів з теоретичними розрахунками та отримано гідравлічні та сепараційні характеристики як модельних, так і промислових зразків інерційно-фільтруючих сепараторів.
4. Проведено комп'ютерне моделювання руху газового потоку у каналах інерційно-фільтруючих сепараторів, що дало змогу визначити місце розміщення та розміри фільтруючого елемента.
5. Розроблено методику розрахунку параметрів процесу у інерційно-фільтруючих сепараторах та інженерну методику розрахунку інерційно-фільтруючих сепараторів в умовах сепарації високодисперсної краплинної рідини з потоку природного газу.
6. Запропоновано нові способи сепарації та нові конструкції інерційно-фільтруючих сепараторів, які захищені деклараційними патентами України, що дозволяють значно підвищити ступінь очищення газового продукту.
7. Проведено впровадження нових інерційно-фільтруючих сепараторів у промислове виробництво, результати якого довели високу ефективність пропонованого обладнання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Склабинский В.И., Стороженко В.Я., Смирнов В.А., Ляпощенко А.А. Анализ технологической схемы и работы оборудования установки осушки природного газа и узла сепарации // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2003. — №6. — С. 70-75.
2. Склабінський В.І., Ляпощенко О.О. Підвищення ступеня утилізації побіжного нафтового та природного газів шляхом застосування високоефективного газосепараційного устаткування // Вісник Сумського державного університету. — 2004. — №2(61). — С. 65-69.
3. Ляпощенко О.О., Склабінський В.І. Механізми формування високодисперсної краплинної рідини у потоці природного газу // Сборник "Физика аэродисперсных систем". — 2005. — С. 7-15.
4. Ляпощенко О.О., Склабінський В.І. Підвищення ефективності сепараційного устаткування компресорних установок нафтогазової промисловості // Вісник Сумського державного університету. — 2005. — №1(73). — С. 58-68.
5. Склабінський В.І., Ляпощенко О.О. Газосепараційне та масообмінне обладнання нафтогазопереробних та хімічних виробництв. Промислові випробування дослідно-промислових зразків // Хімічна промисловість України. — 2005. — №6(71). — С. 24-27.
6. Декл. пат. №60782 А Україна, МПК 7 В01D45/04. Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку і пристрій для його здійснення / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко. — №2003021503; Заявлено 20.02.2003; Надрук. 15.10.2003; Бюл. №10; 2003 р.
7. Декл. пат. №69701 А Україна, МПК 7 В01D45/04. Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку і пристрій для його здійснення / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко. — №20031110451; Заявлено 20.11.2003; Надрук. 15.09.2004; Бюл. №9; 2004 р.
8. Ляпощенко О.О., Склабінський В.І. Високоефективне інерційно-фільтруюче газосепараційне обладнання у нафтогазовій промисловості // Проблеми економії енергії: Збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції. — Львів, 2003. — С. 106-107.
9. Склабінський В.І., Ляпощенко О.О. Дослідження високоефективного інерційно-фільтруючого сепараційного обладнання компресорних установок нафтогазової промисловості // Праці 11-ї Міжнародної науково-технічної конференції "Герметичність, вібронадійність та екологічна безпека насосного і компресорного обладнання" — "ГЕРВІКОН-2005": В 3 т. — Т.3. — Суми, 2005. — С.166-176.

АНОТАЦІЯ

Ляпощенко О.О. Гідродинаміка інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв очищення природного газу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології. — Сумський державний університет, Суми, 2006.

Дисертація присвячена розв'язанню задач дослідження особливостей гідродинаміки криволінійних течій по каналах інерційно-фільтруючого газосепараційного устаткування. Встановлені розрахункові залежності для визначення гідродинамічних характеристик та сепараційних показників інерційно-фільтруючих крапле- та тумановловлювачів. Розроблено методики розрахунку інерційно-фільтруючих сепараторів, що дозволяють визначити параметри процесу сепарації та основні геометричні розміри сепараційних вузлів. Винайдено умови реалізації нового способу сепарації високодисперсної краплинної рідини з використанням нових конструкцій інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв. Проведено впровадження нових інерційно-фільтруючих сепараторів на промислових підприємствах нафтогазового комплексу України, результати якого довели високу ефективність пропонованого обладнання.

Ключові слова: інерційно-фільтруючий сепараційний пристрій, гідравлічний опір, ефективність сепарації, очищення природного газу.

АННОТАЦИЯ

Ляпощенко А.А. Гидродинамика инерционно-фильтрующих сепарационных устройств очистки природного газа. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 — процессы и оборудование химической технологии. — Сумский государственный университет, Сумы, 2006.

Диссертация посвящена решению задач исследования особенностей гидродинамики криволинейных течений по каналам инерционно-фильтрующего газосепарационного оборудования, в котором усовершенствовано динамику движения газожидкостного потока, что обеспечивает повышение улавливающей способности (предотвращение вторичного уноса, организация стабильного стока уловленной жидкости) и снижение гидравлического сопротивления, а следовательно, интенсификацию и повышение удельной производительности и эффективности процесса сепарации высокодисперсной капельной жидкости.

Вопросы усовершенствования технологии и техники очистки попутного

нефтяного и природного газов становятся актуальными вследствие постоянно ужесточающихся требований нормативных документов к влагосодержанию газов. Поэтому представляется целесообразным проведение поисков новых способов сепарации газожидкостных потоков, обеспечивающих высокую эффективность разделения и проектирование высокоэффективного инерционно-фильтрующего газосепарационного оборудования, позволяющие улавливать влагу в виде конденсационного тумана. Улавливание из попутного нефтяного и природного газов конденсата, содержащего ценные углеводородные компоненты, представляет перспективы его дальнейшей переработки и повышение степени использования энергоресурсов нефтегазового комплекса Украины.

Разработана физическая модель формирования высокодисперсной капельной жидкости в потоке природного газа, которая с учетом качественных показателей природного газа позволяет оценить функцию плотности распределения дисперсного состава капель конденсата и парообразной влаги. Математическая модель газодинамики движения газожидкостного потока по инерционной и фильтрующей секциям сепаратора позволяет рассчитать скорость осаждения и минимальный размер капель, которые улавливаются инерционной секцией сепарационного канала; представляет возможным определить критические скорость газового потока, толщину пленки стекающей жидкости и высоту зоны фильтрования, при превышении значений которых становится неизбежным вторичный унос. Установлена зависимость между коэффициентом эффективности сепарации и комплексом параметров, характеризующих фракционный состав потока, геометрические размеры инерционно-фильтрующих сепарационных элементов, а также гидродинамические и физические параметры потока.

Экспериментально установлен характер распределения локальных скоростей движения газового потока по криволинейному сепарационному каналу в области переходного и турбулентного гидродинамических режимов движения газового потока ($2300 \leq Re \leq 100000$). Расчетные зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований гидравлического сопротивления и эффективности сепарации моделей инерционно-фильтрующих капле- и тумануловителя, могут быть адекватно распространены на класс новых конструкций высокоэффективных сепарационных устройств, работающих в области переходного и турбулентного гидродинамических режимов движения газового потока ($v=0,3-5,0$ м/с) с начальным влагосодержанием $C_w \leq 200$ г/м³.

Компьютерным моделированием трехмерных течений двухфазного газового потока с высокодисперсной в нем капельной жидкостью получено поле скоростей в инерционной зоне криволинейного сепарационного канала, характер которого качественно соответствует исследованному экспериментально на

модельном образце. Визуализация результатов моделирования трехмерных течений позволяет определить значения гидродинамических параметров потока, геометрию зон пониженного давления и вихреобразования в сепарационном канале, на основании которых определены место целесообразного расположения, геометрия и размеры фильтрующего элемента.

Разработаны методика расчета параметров процесса в инерционно-фильтрующих сепараторах и инженерная методика расчета инерционно-фильтрующих сепараторов в условиях сепарации высокодисперсной капельной жидкости из потока природного газа. Составлены алгоритм и программа расчета на ЭВМ для оценки эффективности работы инерционно-фильтрующего туманоуловителя и определения размеров максимально проникающих частиц дисперсной фазы.

Изобретены условия реализации новых способов сепарации высокодисперсной капельной жидкости из газового потока с использованием новых конструкций инерционно-фильтрующих сепарационных устройств, защищенные декларационными патентами Украины.

Приведены результаты промышленных испытаний опытно-промышленных образцов газосепараторов, даны рекомендации к разработке и внедрению новых инерционно-фильтрующих сепараторов на промышленных предприятиях нефтегазового комплекса Украины.

Ключевые слова: инерционно-фильтрующее сепарационное устройство, гидравлическое сопротивление, эффективность сепарации, очистка природного газа.

SUMMARY

Lyaposchenko A.A. Hydrodynamics inertial-filtering separating devices for natural gas clearing. — The manuscript.

The dissertation on getting a scientific degree of candidate of technical science, on a speciality 05.17.08 — processes and the equipment of chemical technology. — Sumy State University, Sumy, 2006.

The main purpose of this dissertation is to show how to solve problems of research peculiarity of curved line stream hydrodynamics over channels of inertial-filtering gas separating equipment. The calculating dependences for definition of hydrodynamical characteristics and separate indexes of inertial-filtering drop- and mist catcher are determined. The methodology of calculation of inertial-filtering separators, which allow to define parameters of separating process and the basic geometrical sizes of separating units, is elaborated. Conditions of realization of a new way

separation of high-dispersive dripping liquid with use of new designed inertial-filtering separating equipment are invented. The introduction of new inertial-filtering separators at the industrial enterprises of an oil-and-gas complex of Ukraine is carried out. Results have proved high efficiency of the offered equipment.

Keywords: the inertial-filtering separating equipment, hydraulic resistance, efficiency of separation, clearing of natural gas.

Підписано до друку 04.04.2006.

Папір офсетний.

Формат 60x90/16.

Наклад 100 прим.

Друк офсетний.

Обл.-вид. арк. 0,9.

Замовл. № **213**.

Ум. друк. арк. 1,2.

Видавництво СумДУ. Свідоцтво ДК №2365 від 08.12.2005 р.

40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2

Друкарня СумДУ. 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2