

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ІНЕРЦІЙНО- ФІЛЬТРУЮЧОГО СЕПАРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВОК НАФТОГАЗОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

В.І. Склабінський, д-р техн. наук, професор;

О.О. Ляпощенко, асист.

Сумський державний університет

Наведено результати теоретичних досліджень, віртуальних комп'ютерних моделювань тривимірних течій потоку природного газу по 3D моделях, експериментальних досліджень та промислових випробувань інерційно-фільтруючих газосепараційних пристроїв. Обґрунтовано їх високу науково-практичну цінність у плані підвищення ефективності сепараційного устаткування у схемах компресорних установок і, як наслідок, технічного переоснащення об'єктів нафтогазової промисловості.

Природний газ, що надходить зі свердловин, містить значну кількість сторонніх включень, а саме: краплинної рідини, що складається з мінералізованої води, газового конденсату, метанолу й інших, як правило, у кількості 30-40 г/м³, але сягаючих навіть 200-800 г/м³ і механічних домішок - в основному здрібнених часток породоутворювальних мінералів, а також утворених у результаті технологічних забруднень [1].

Наявність згаданих сторонніх включень у газовому потоці призводить до аварійних ситуацій і передчасного зношення основного й допоміжного технологічного обладнання (абразивного зношення запірних арматур, зношування шийок ротора та лопаток нагнітачів компресорних станцій, перемерзання допоміжних трубопроводів і утворенню гідратних пробок в основному технологічному обладнанні) [2]. До того ж наявність твердо-рідинної фази в природному газі негативно впливає на гідравлічні характеристики трубопроводу, наявність краплинної рідини в газі призводить до зниження продуктивності й коефіцієнта використання магістральних трубопроводів у середньому на 20-25% внаслідок підвищення гідравлічного опору, що призводить до загального зниження ефективності газотранспортної системи [3, 4].

Тому наявність краплинної рідини й механічних домішок у природному газі обмежується нормативними документами й питання очищення є одним із найважливіших у технологічному циклі підготовки й транспортування газу.

Очищення газу здійснюється на всіх етапах технологічного циклу:

- при видобутку газу на промислах, де в складі установок комплексної підготовки газу (УКПГ) газоочисне встаткування є основним;

- при транспортуванні на компресорних станціях (КС);

- на газорозподільних станціях (ГРС).

З метою очищення природного газу використовується різноманітне за принципом роботи, конструкцією, продуктивністю й призначенню газоочисне встаткування, зокрема — газосепаратори вертикальні, горизонтальні, кульові, відцентрові регульовані, жалюзійні, сітчасті; пиловловлювачі масляні, мультициклони, адсорбери й абсорбери різноманітних конструкцій. Однак все це встаткування поєднує одне — низька ефективність очищення, що не перевищує 30-40%, досягаючи, однак і 15% [5]. Сьогодні в експлуатації знаходяться багато тисяч одиниць штатного газоочисного устаткування із згаданими характеристиками, тому поставки його сучасних модифікацій, освоєних

вітчизняними виробниками останніми роками істотної зміни в ситуацію не внесли.

Суть пропонованого заходу полягає в модернізації газоочисного устаткування, яке знаходиться в експлуатації, за допомогою заміни заводських сепаруючих вузлів, що являють собою жалюзі, ґрати, тарілки, сітки, мультициклони та інші на вузли, поєднуючі поряд з основними інерційними елементами фільтруючі полотна з полімерних волокон, які в сполученні з оригінальними конструктивними рішеннями [6, 7] дозволяють підвищити ефективність до 99,5-99,9%, забезпечити тривалий міжрегенераційний ресурс та багаторазову регенерацію. Причому підвищення ефективності очищення природного газу дозволяє вирішувати питання не тільки технологічної властивості, але й одержувати додаткову кількість газового конденсату — кошовної вуглеводневої сировини [8].

Завдання досліджень — моделювання тривимірних течій двофазного газового потоку з високодисперсною у ньому краплинною рідиною по зазначених технічних об'єктах з метою візуалізації цих течій методами комп'ютерної графіки.

3D (тривимірна) геометрична модель захищеної патентами України (№ 60782 А, № 69701 А) конструкції інерційно-фільтруючого газосепараційного пристрою [6, 7] створена за допомогою системи тривимірного твердотілого моделювання КОМПАС-3D V7 Plus (<http://www.ascon.ru/>), після чого за допомогою програмного продукту COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release (<http://www.cosmosm.com/>) CAD-системи SolidWorks 2006 (<http://www.solidworks.com/>), а також програмного комплексу FlowVision 2.2 (<http://www.flowvision.ru/>), проведено комплексні спроби моделювання пливу двофазного потоку природного газу в створеній геометричній конфігурації розрахункової області сепараційного каналу (рис.1).

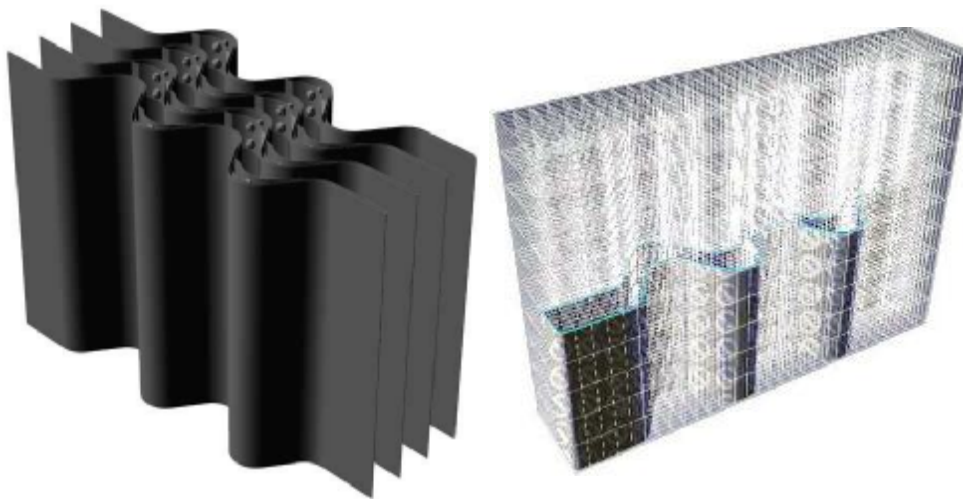


Рисунок 1 — 3D геометрична модель інерційно-фільтруючого газосепараційного пристрою та розрахункова область сепараційного каналу

FlowVision заснований на кінцево-об'ємному методі розв'язування рівнянь гідродинаміки й використовує прямокутну адаптивну сітку з локальним подрібненням. Для апроксимації криволінійної геометрії з підвищеною точністю використовується технологія підсіткової щільності геометрії, що дозволяє імпортувати геометрію із систем САПР і обмінюватися інформацією із системами кінцево-елементного аналізу. Використання цієї технології дозволило вирішити проблему автоматичної генерації сітки (щоб згенерувати розрахункову сітку, досить задати

всього лише кілька параметрів, після чого сітка автоматично генерується для розрахункової області, що має геометрію будь-якого ступеня складності).

Залежно від типу руху обрано так звану модель, тобто набір рівнянь, якими описується рух газу. Істотно дозвуковий рух газового потоку описується обраною математичною моделлю Incompressible fluid (Нестискаема рідина) з Particles (Частки), призначеною для моделювання двофазної течії газу (рідини) з частками за значних (турбулентних) чисел Рейнольдса й при малій зміні густини. Завдання вирішувалося для розвинутої турбулентної течії, у якому розв'язуються тільки рівняння Нав'є-Стокса для нестисненої рідини та рівняння перенесення для турбулентної енергії і дисипації [9].

Рівняння Нав'є-Стокса

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

$$\nabla V = 0, \quad (2)$$

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.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} f_\mu, \quad (3)$$

де k – турбулентна енергія, м²/с; ε – швидкість дисипації турбулентної енергії, м²/с³.

$$S = \left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho} \right) g + B + \frac{R}{\rho}, \quad (4)$$

де ρ_{hyd} – гідростатична густина, кг/м³; g – вектор сили ваги, м/с²; B – сили обертання (Коріоліса та відцентрова) у обертальній системі координат, м/с²; R – сили ізотропного та (або) анізотропного фільтра опору, кг/(м²·с²).

Рівняння енергії

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(Vh) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho}, \quad (5)$$

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.

Модель турбулентної нестисненої рідини заснована на k - ε моделі турбулентності:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(Vk) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \frac{G}{\rho} - (\varepsilon - \varepsilon_{ini}), \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(V\varepsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_1 \frac{G}{\rho} - C_2 f_1 (\varepsilon - \varepsilon_{ini}) \right), \quad (7)$$

де ε_{ini} – початкове значення турбулентної дисипації, м²/с³; $\sigma_k=1$, $\sigma_\varepsilon=1$, $C_\mu=0,09$, $C_1=1,44$, $C_2=1,92$ – значення параметрів k - ε моделі.

Рівняння конвективно-дифузійного перенесення:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(VC) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla C \right), \quad (8)$$

де C – масова концентрація; Sc (Sc_t) – число (турбулентне) Шмідта.
Рівняння нерозривності для несучої фази:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = Q_{mass}, \quad (9)$$

де Q_{mass} – джерело маси за рахунок часток, кг/(м³·с).

Рівняння збереження маси для речовини, що є парою речовини часток

$$\frac{\partial(\rho Y_1)}{\partial t} + \nabla(\rho V Y_1) = \nabla \left(\left(\rho D_1 + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_1 \right) + Q_{mass}, \quad (10)$$

де Y_1 – масова концентрація речовини, що є парою речовини часток;
 D_1 – коефіцієнт дифузії масової концентрації, м²/с.

Турбулентні числа Шмідта та Прандтля покладаються такими, що дорівнюють одиниці:

$$Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t} = 1 \quad \text{та} \quad Pr_t = \frac{\mu_t C_p}{\lambda_t} = 1. \quad (11)$$

Рівняння збереження імпульсу для несучої фази

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla(\rho V \otimes V) = -\nabla P + \nabla \tau + \rho g + \vec{Q}_{mom}, \quad (12)$$

де Q_{mom} – джерело імпульсу за рахунок часток (об'ємна сила опору, діюча на несучу фазу збоку часток), Н/м³.

Рівняння збереження енергії для несучої фази:

$$\frac{\partial(\rho h T)}{\partial t} + \nabla(\rho V h T) = \nabla \left(- \left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h T \right) + Q_{enth}, \quad (13)$$

де Q_{enth} – джерело енергії за рахунок часток, Вт/м³.

Динаміка часток (particles):

$$\frac{dX_p}{dt} = V_p, \quad (14)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{\pi d^2}{8m} C_D \rho |V_r| V_r + g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) \frac{\nabla P}{\rho_p}, \quad (15)$$

де X_p – положення частки (вектор), м; d – діаметр частки, м; m – маса частки, кг; C_D – коефіцієнт опору; V_r – швидкість частки відносно несучої фази, м/с.

Крок за часом обчислювального алгоритму задається явним числом Куранта, а також, якщо обрано неявний алгоритм розрахунку, неявним числом Куранта або фіксованою величиною кроку. При виборі кроку за часом варто виходити в першу чергу з того, які математичні моделі використовуються в даному завданні. Для моделі Incompressible Fluid (Нестиснена рідина) крок за часом можна задати менше або такими, що дорівнюють 0,1 пролітного часу. Пролітним часом називається той час, що буде потрібно частці, випущеній із входу в розрахункову область, щоб досягти виходу розрахункової області. Розмір області в напрямку пливу потоку вздовж сепараційного каналу дорівнює 1 метру, швидкість 1 м/с, у такий спосіб пролітний час дорівнює 1 секунді й крок припускається таким, що дорівнює 0,1 секунди.

Візуалізацію результатів розрахунку здійснено за допомогою постпроцесора. Аналіз може вироблятися як у процесі розрахунку, так і після його закінчення. Постпроцесор надає великий вибір методів візуалізації скалярних і векторних змінних на різних геометричних об'єктах, а також дозволяє зберігати дані у файл для обробки іншими засобами.

Змодельовані тривимірні течії потоку природного газу з високодисперсною у ньому краплинною рідиною по криволінійному сепараційному каналу жалюзійного газосепаратора, насадкових сітчастих сепараційних та масообмінних елементах візуалізовано методами комп'ютерної графіки у вигляді шарів перетину повздовж руху потоку з заливками за значеннями швидкості, тиску, а також анімаційного зображення спалахів траекторій руху часток потоку по об'єму зазначених об'єктів.

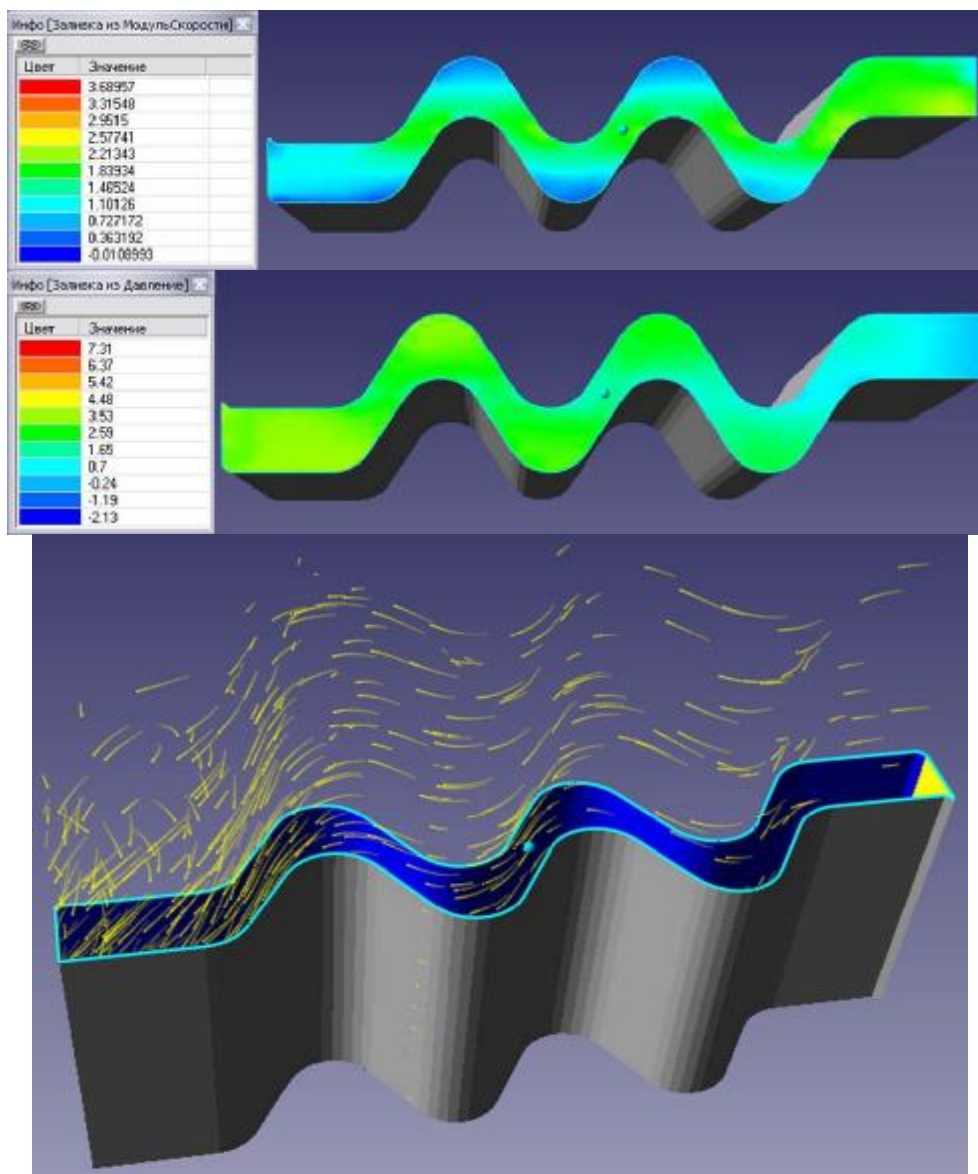


Рисунок 2 — Візуалізація результатів моделювання тривимірної течії потоку природного газу по криволінійному сепараційному каналу жалюзійного газосепаратора

Аналізуючи графічно відображені значення гідродинамічних параметрів потоку та траєкторії руху часток по криволінійному сепараційному каналу (рис.2), можна чітко визначити геометрію зон пониженого тиску та вихроутворень, у яких найбільш доцільно розмістити фільтруючий елемент для вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку за рахунок поліпшення умов відведення вловленої рідини (створення стабільного стоку вловленої рідини, запобігання вторинного унесення та виходу на режими захлинання), удосконалення конструкції робочого об'єму поєднанням криволінійних сепараційних каналів та криволінійних дренажних каналів, закритих для газового потоку, що забезпечує можливість роботи у більш широкому діапазоні навантажень по газовій фазі та зниження гідравлічного опору і, отже, підвищення питомої продуктивності процесу сепарації високодисперсної краплинної рідини.

Також суттєву увагу привертають дослідження у напрямку моделювання тривимірної течії двофазного потоку в 3D геометричних моделях насадкових сітчастих сепараційних та масообмінних елементів по каналах складної конфігурації з перехресними токами у плані найбільш ефективного перерозподілу потоків у тарілчастих ступенях сітчастих газосепараторів а також сепараційних ступенях масообмінних колон [10].

Роботу експериментальних зразків інерційно-фільтруючих газосепараційних пристроїв експериментально досліджено в лабораторних умовах кафедри „Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв” (ПОХНВ) Сумського державного університету (СумДУ) (рис.3). На ґрунті проведених комплексних теоретичних та експериментальних досліджень гідродинаміки та структури двофазних газових потоків з високою дисперсією в них рідиною винайдено та запатентовано нові способи обробки газорідних потоків і пристрої для їх здійснення, що забезпечують високу ефективність розподілення [6, 7].

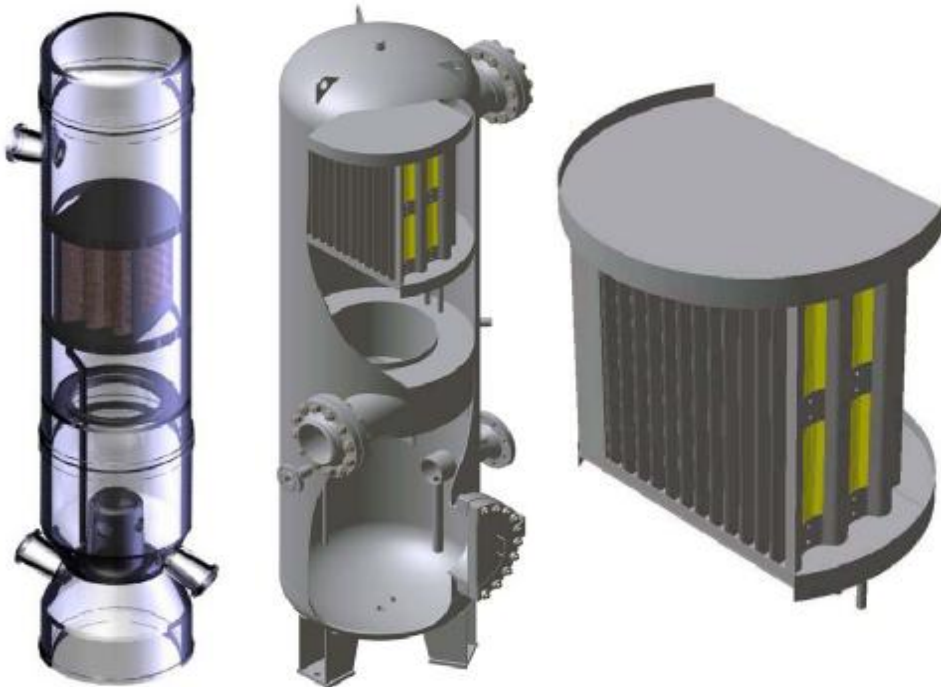


Рисунок 3 — Експериментальна модель та модернізований гравітаційно-інерційний жалюзійний газосепаратор ГСВИ 64-1000 з інерційно-фільтруючим туманоуловлювачем

Промислові випробування дослідно-промислових зразків інерційно-фільтруючих газосепараційних пристроїв проведено у рамках науково-дослідних робіт ВАТ «Укрнафта» за розробкою „Удосконалення обладнання вузла сепарації товарного газу”, для нормалізації роботи блоку осушування газу (БОГ) Качанівського ГПЗ, запропоновано ряд проектних рішень з конструктивного оформлення сепараційних пристроїв (вертикальні блоки волокнистих фільтруючих елементів, тарілчаста ступінь патронних волокнистих туманоуловлювачів) контактора 55-2400 (абсорбційної колони) БОГ. У застосовуваних у технологічній схемі IV ступеня стискання дотискувальної компресорної станції (ДКС) гравітаційно-інерційних жалюзійних газосепараторах ГСВИ 64-1000 проведено заміну вертикальних жалюзійних відбійників на інерційно-фільтруючий туманоуловлювач (рис.3), розроблено конструкторську документацію із удосконалення сітчастих газосепараторів ГС-П-64-1200 Глинсько-Розбишівського виробництва.

У нафтогазових сепараторах типу НГС та НГСВ, струнних та сітчастих газосепараторах, газосепараторах з відцентровими елементами, факельних сепараторах, що виготовляються за державними і галузевими стандартами та застосовуються у системах промислового збору і установках комплексної підготовки нафти та газу також можлива модернізація обладнання шляхом застосування винайдених та запатентованих нових способів обробки газорідних потоків і встановлення високоефективних інерційно-фільтруючих газосепараційних пристроїв для їх здійснення.

Промислові випробування модернізованих газосепараторів довели підвищення на ступінь значення ефективності сепарації і, отже, доцільність застосування інерційно-фільтруючого сепараційного устаткування, що дозволяє визволити з потоку природного газу вологу у вигляді конденсаційного туману. Аналіз природного газу у відповідному колекторі на вході та відповідно виході зі стандартних (С-2/1, С-2/3) та модернізованого (С-2/2) газосепараторів ГСВИ 64-1000 ДКС IV ст. ст. з розрахунком потенційного вмісту цільових компонентів виконано вимірювальною хіміко-аналітичною лабораторією Качанівського ГПЗ (табл.1).

Таблиця 1 — Аналізи газу з розрахунком потенційного вмісту цільових компонентів

Поток газу у колекторі	Компонентний склад газу, % об.										
	O ₂	N ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	n-C ₄ H ₁₀	i-C ₅ H ₁₂	n-C ₅ H ₁₂	C ₆ H _{14+в}
до С-2/1-3	0,15	1,64	1,41	86,87	7,14	2,34	0,12	0,20	0,04	0,04	0,05
після С-2/1	0,16	1,66	1,56	86,75	7,12	2,32	0,12	0,20	0,04	0,03	0,04
після С-2/2	0,19	1,76	1,54	86,95	7,09	2,08	0,09	0,18	0,04	0,03	0,05

Продовження табл. 1

Поток газу у колекторі	Густина відн.	Вміст важких вуглеводнів, г/м ³				Сума важ. вуглев. г/м ³	Крапка роси по волозі при 36 атм.
		C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H _{14+в}		
до С-2/1-3	0,642	45,94	8,28	2,57	1,92	58,71	1,75
після С-2/1	0,643	45,55	8,28	2,25	1,54	57,62	1,70
після С-2/2	0,640	40,84	6,99	2,25	1,92	51,99	-3,30

Результати віртуальних комп'ютерних моделювань, експериментальних досліджень та промислових випробувань являють високу науково-практичну цінність у плані теоретичних досліджень з математичного моделювання газодинаміки руху газорідного потоку,

розроблення методик проектних технологічних та конструктивних розрахунків сепараційного устаткування і, як наслідок, технічного переоснащення компресорних установок нафтогазової промисловості.

SUMMARY

Results of theoretical researches, virtual computer modeling of three-dimensional currents of a stream of natural gas in 3D models, experimental researches and industrial tests inertial-filtering gas separate devices are resulted. Their high scientific-practical value is proved by way of increase of efficiency the separate equipment in circuits of compressor installations and, as consequence, technical reequipment of objects of the oil-and-gas industry.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. О.О.Ляпощенко, В.І.Склабінський. Механізми формування високодисперсної краплинної рідини у потоці природного газу // Дисперсные системы. Тезисы докладов XXI научной конференции стран СНГ. — Одесса, 2004. — С. 203-204.
2. Склабінський 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.
3. О.О.Ляпощенко, В.І.Склабінський. Підвищення ефективності сепараційного устаткування компресорних установок нафтогазової промисловості // Компресорная техника и пневматика в XXI веке. Труды XIII Международной научно-технической конференции по компрессоростроению. — Сумы, 2004. — С. 267-277.
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. В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко. Підвищення ступеня утилізації побіжного нафтового та природного газів шляхом застосування високоефективного газосепараційного устаткування // Вісник Сумського державного університету. — 2004. — №2(61). — С. 65-69.
6. Деклараційний патент на винахід України № 60782 А, МПК 7 B01D45/04. Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку і пристрій для його здійснення / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко. — Бюл. № 10, 15.10.2003.
7. Деклараційний патент на винахід України № 69701 А, МПК 7 B01D45/04. Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку і пристрій для його здійснення / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко. — Бюл. № 9, 15.09.2004.
8. О.О.Ляпощенко, В.І.Склабінський. Високоефективне інерційно-фільтруюче газосепараційне обладнання у нафтогазовій промисловості // Проблеми економії енергії: Збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції. — Львів, 2003. — С. 106-107.
9. Ляпощенко О.О., Склабінський В.І. Комп'ютерне моделювання пливу потоку природного газу по 3D моделях газосепараційних елементів // Технологія 2005. Збірник тез доповідей VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. — Северодонецьк, 2005. — С.41-42.
10. Склабінський В.І., Ляпощенко О.О. Дослідження високоефективного інерційно-фільтруючого сепараційного обладнання компресорних установок нафтогазової промисловості // ГЕРВИКОН-2005. Труды 11-й Международной научно-технической конференции «Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования»: В 3 т.— Сумы, 2005. — Т.3. — С. 166-176.

Надійшла до редакції 9 листопада 2005 р.