

О.О. Ляпощенко, к.т.н., доцент, докторант; В.М. Маренок, м.н.с.; А.В. Логвин, асистент; О.В. Настенко, аспірант (Сумський державний університет), Р.А. Синельник, гол. інженер (ПрАТ «Укргазвидобуток», м. Київ)

Моделювання процесів сепарації та прогнозування ефективності роботи газосепараторів промислових установок газових та газоконденсатних родовищ

Проведено комп'ютерне моделювання гідродинаміки та механізмів сепарації газоконденсатної суміші у досліджуваному газосепараторі при зміні робочих режимних параметрів роботи (продуктивність по газу, робочий тиск, початковий вміст краплинної рідини). Проведена оцінка ефективності очистки природного газу від краплинної рідини та вуглеводневого конденсату у горизонтальному газосепараторі.

Ключові слова: сепарація, газосепаратор, природний газ, конденсат, краплі, гідравлічний опір, ефективність.

Выполнено компьютерное моделирование гидродинамики и механизмов сепарации газоконденсатной смеси в исследуемом газосепараторе при изменении рабочих режимных параметров работы (производительность по газу, рабочее давление, исходное содержание капельной жидкости). Проведена оценка эффективности очистки природного газа от капельной жидкости и углеводородного конденсата в горизонтальном газосепараторе.

Ключевые слова: сепарация, газосепаратор, природный газ, конденсат, капли, гидравлическое сопротивление, эффективность.

The computer design of hydrodynamics and mechanisms of separation of gas condensate mixture is conducted in the prospected separator at the change of operating regime parameters of work (productivity on gas, working pressure, initial content of tiny liquid). The estimation of efficiency of cleaning of natural gas is conducted from a tiny liquid and hydrocarbon runback in horizontal separator.

Keywords: separation, gas separator, natural gas, condensate, drops, flow resistance, efficiency.

Вуглеводневі гази, що видобуваються з надр, насичені водяними парами. У процесі транспортування і переробки багаторазово змінюється термодинамічний стан газу. За умов конденсації в технологічних системах утворюються гідрати, що закупорюють трубопроводи і трансферні лінії апаратів. При вмісті в газах водяної пари і сірчистих з'єднань створюються умови, які сприяють корозії металів.

Основними технологічними способами підготовки газу до транспортування та переробки є процеси сепарації, а газосепараційне обладнання – обов'язковий елемент на промислових установках комплексної підготовки газу газових та газоконденсатних родовищ [1]. Однак все існуюче сепараційне устаткування поєднує одне – низькі ефективність очищення та ступінь розділення, що не перевищує 70% та забезпечує лише грубе очищення газів [2].

Науковцями кафедри «Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв» факультету технічних систем та енергоефективних технологій Сумського дер-

жавного університету вже понад 10 років ведуться дослідження, що спрямовані на розробку нових способів та технологій сепарації газоконденсатних сумішей [3], які сьогодні є актуальними.

Перспективною для промислової підготовки природного газу є технологія газодинамічної сепарації газоконденсатних сумішей, яка реалізується в газодинамічних сепараторах. В той же час, при проектуванні сучасного сепараційного обладнання виникають суттєві труднощі, пов'язані з відсутністю методик інженерного розрахунку такого обладнання, а відомі результати фізичних і математичних моделювань не достатньо точно та адекватно описують гідродинамічні процеси при сепарації газорідних потоків. Тому на даний момент найбільш доцільним представляється дослідження гідродинаміки газодинамічного сепараційного обладнання комп'ютерним моделюванням методами обчислювальної гідродинаміки (Computational fluid dynamics (CFD), рухливих клітинних автоматів (movable cellular automata (MCA), або

дискретного елементу (discrete element method (DEM).

Мета роботи – оцінка ефективності очистки природного газу від краплинної рідини та вуглеводневого конденсату у газодинамічному газосепараторі.

Об'єктом дослідження є блочний горизонтальний інерційний газодинамічний газосепаратор для очищення природного газу від краплинної рідини та вуглеводневого конденсату на промислових установках комплексної підготовки газу (УКПГ) газових та газоконденсатних родовищ.

Досліджуваний блочний горизонтальний газосепаратор складається з двох блоків: сепаратор та збірник вловленої рідини. Блоки поєднані між собою трубами, через які відводиться відсепарована рідина з окремих ступенів сепаратора у збірник. Газорідна суміш, яка подається на сепарацію, надходить до вхідного пристрою сепаратора, що являє собою вузол попередньої сепарації (рис. 1а) інерційно-відцентрового типу. Звільнений від найбільш важких та великих краплин газорідний потік надходить у відцентровий однопатрубковий

сепараційний пристрій (рис. 1б) з лопатково-аксіальним завихрювачем, в якому здійснюється більш якісне очищення газового потоку від краплинної рідини. Для тонкого очищення газу сепаратор обладнаний блоком вертикальних криволінійних жалюзійних пластин (рис. 1в), де здійснюється остаточне очищення газу від бризок рідини.

Для досягнення поставленої мети дослідженню слід послідовно розв'язати наступні задачі:

- дослідження гідродинаміки сепараційних пристроїв методом обчислювальної гідродинаміки;
- визначення гідравлічного опору сепараційних вузлів газосепаратора;
- дослідження умов відведення вловленої рідини;
- визначення фракційної та сумарної ефективності сепарації газосепаратора.

Усі математичні формулювання основних рівнянь гідро/газодинаміки потоків є системою нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку, що мають аналітичне рішення лише в дуже простих випадках, коли число Рейнольдса для задачі мале, а геометрія проста.

Сформульована базова математична модель (рівняння нерозривності, рівняння збереження імпульсу, рівняння збереження енергії, рівняння стану) течії середовища у сепараторі, з урахуванням особливостей вирішуваної задачі доповнена рівняннями для моделей турбулентності, перенесення речовин, обрахунку багатозначності та динаміки часток. Основним завданням є чисельне розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса, що описують динаміку рідини та газу. Наразі, при моделюванні методом обчислювальної гідродинаміки процесу сепарації проведено так звану дискретизацію простору і часу так, що геометрію розрахункової області (рис. 1) розбито на розрахункові осередки, вибрані особливим чином (оптимізована початкова нерівномірна розрахункова сітка складає 35x22x24 вузлів, задано критеріальну адаптацію за граничними умовами, число осередків – 252375, число розрахункових осередків – 169700), а час процесу - на розрахункові тимчасові інтервали (крок за часом задано рівним 0,1 часу, який знадобиться частці, випущеній з входу в розрахункову область, щоб досягти виходу розрахункової області). Далі можливе розв'язання системи рівнянь наступними методами:

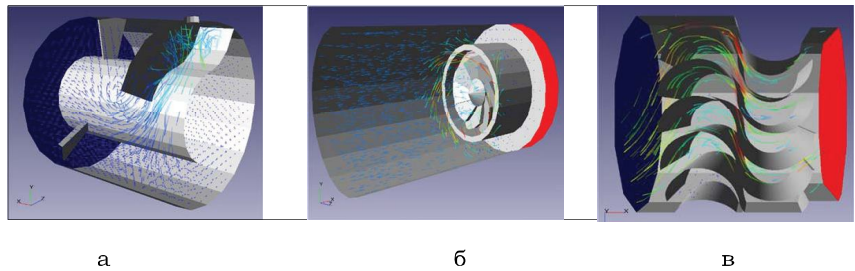


Рис. 1. Траєкторії руху потоку природного газу в розрахункових областях моделей сепараційних пристроїв газосепаратора (з підфарбуванням за значенням модуля локальних швидкостей v , м/с): а - вузол попередньої сепарації, б - відцентровий однопатрубковий сепаратор, в - блок вертикальних криволінійних жалюзійних пластин (бризковловлювач)

кінцевих різниць, кінцевих об'ємів, кінцевих елементів, згладжених часток та з використанням функції розподілу вірогідності. Результати чисельного розрахунку застосовуються для візуального аналізу складних тривимірних течій двофазного потоку. Для цього використано повний набір стандартних методів візуалізації течій – ізолінії, тонове забарвлення, різні графіки однієї змінної, вектору, ізоповерхня, анімаційні методи візуалізації векторного поля, характеристики течії в точці, інтегральні характеристики течії на площині і поверхні (рис. 1-3).

Для оцінки ефективності сепарації газосепаратора необхідно мати уявлення про розподіл за розмірами (фракційний склад) дисперсних часток газоконденсатної суміші та середній розмір краплин, а також об'ємний (ваговий) вміст рідкої фази на вході та виході відповідних ступенів сепарації. Вказані параметри газоконденсатної суміші можливо визначити після розв'язання кінцево-об'ємним методом відповідних основних рівнянь сформульованої математичної моделі.

Дослідження проводились для модельної двофазної системи газ (суцільна фаза) – рідина (частки), при цьому керувались компонентним складом та фізико-хімічними властивостями, визначеними у відповідності до результатів аналізів природного газу, вуглеводневого конденсату та води з місця планованих дослідно-промислових випробувань апарату, виконаних науково-дослідницьким центром ПрАТ «Пласт». Факторний експеримент проведено для початкових умов: температура $t=15^{\circ}\text{C}$, тиск $P=6-14$ МПа. На підставі лабораторних аналізів визна-

чено, що природний газ, який потрапляє зі свердловини на УКПГ до досліджуваного газосепаратора, у своєму складі містить $C_0 \leq 460$ $\text{см}^3 / \text{м}^3$ рідини, у тому числі $Cw \leq 310$ $\text{г} / \text{м}^3$ нестабільного конденсату.

Прогнозування 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 гідравлічного опору ΔP , Па, руху двофазного потоку по апарату, що визначається як сума окремих складових опору, обумовленого рухом газового потоку та наявністю в ньому завислих часток (краплин) [3]:

$$\Delta P = \zeta \frac{v^2 \rho}{2\phi^2} + \zeta_u \frac{v_u^2 \rho_u}{2(1-\phi)^2}, \quad (1)$$

де ζ та ζ_u – коефіцієнт гідравлічного опору для газового потоку та коефіцієнт гідравлічного опору, обумовлений наявністю в газовому потоці завислих часток (краплин) відповідно; v та v_u – швидкість руху газового потоку та дисперсних часток відповідно, м/с; ρ та ρ_u – густина суцільної та дисперсної фаз відповідно, $\text{кг} / \text{м}^3$; ϕ – доля перетину апарату, зайнята газом.

В даній роботі гідравлічний опір (падіння статичного тиску) окремих ступенів сепарації та газосепаратора у цілому визначено на підставі отриманих у результаті комп'ютерних моделювань розподілів полів тисків у відповідних розрахункових областях геометричних моделей (рис. 2).

Узагальнення результатів комп'ютерних моделювань та розрахунку гідравлічного опору газосепаратора здійснено шляхом побудови графічних залежностей гідравлічного опору ΔP від симплек-

су визначаючих параметрів газового потоку – $(\nu^2\rho)/2$ (рис. 3). При чому, при визначенні загального гідравлічного опору газосепаратора враховано також місцеві опори в штуцерах на вході-виході газового потоку в сепараторі.

При апроксимації експериментально отриманих значень та побудові графічних залежностей гідравлічного опору від витрати газового потоку (рис. 3) виявлено непропорційне підвищення гідравлічного опору сепараційних пристроїв при однакових швидкостях руху потоку газу та різних тисках. Відомо, що значення коефіцієнту гідравлічного опору для газового потоку у відцентрових та жалюзійних інерційних сепараторах складає $\zeta=4-500$ [3]. У цій роботі визначено значення коефіцієнтів гідравлічного опору для вуглеводневого газоконденсатного потоку, що складають $\zeta_1=260$ та $\zeta_2=1275$ для досліджуваних конструкцій відцентрового однопатрубкового сепаратора з лопатково-аксіальним завихрювачем та жалюзійного блока вертикальних криволінійних пластин з двох напітвруб відповідно. Цей факт доводить попереднє припущення щодо впливу наявності завислих часток (краплин рідини) на рух газового потоку у відповідності до залежності (1).

Після обрахунку витратних показників газового G , кг/с, та рідинного L , кг/с, потоків у відповідності до вихідних даних моделювань визначено, що співвідношення цих потоків суттєво коливається на вході різних ступенів сепарації у вказаних у межах відповідно: на вході у вузол попередньої сепарації (газосепаратор) $L/G=0,07-0,42$, на вході у відцентровий сепаратор $L/G=0,005-0,26$ та на вході у жалюзійний блок $L/G=0,001-0,07$. Це в свою чергу обумовлює різне навантаження на сепараційні пристрої, що в результаті впливає на їх гідравлічний опір, ефективність та питому продуктивність. Аналізом виявлено оптимальні гідродинамічні режими роботи відповідних ступенів сепарації та визначено області ймовірного виходу на режими захлинання та активного вторинного утворення потоку бризк. При цьому підвищується гідравлічний опір, стає неможливим досягнення високого ступеня очищення, знижується значення здатності вловлювання, ефективності та питомої продуктивності газосепаратора (рис. 5).

Таким чином, адекватність поширення отриманих розрахункових значень коефіцієнтів гідравлічного опору обмежується областю турбулентного гідродинамічного режиму руху потоку $10000 \leq Re \leq 200000$ та відповідним співвідношенням рідинного та газового потоків (L/G) у вказаних межах, а складова залежності (1), що враховує гідравлічний опір, обумовлений наявністю в газовому потоці завислих часток (краплин), має також враховувати співвідношення L/G .

Для оцінки ефективності роботи газосепаратора за загально прийнятим критерієм, яким є коефіцієнт сепарації η , спочатку слід розглянути та моделювати процеси (механізми) сепарації в окремих ступенях апарату. Загальну схему розділення в досліджуваному інерційному газодинамічному газосепараторі можна уявити наступним чином. Відомо, що основними механізмами формування крапель у турбулентному потоці газу за відсутності конденсації є процес подрібнення та коагуляції, які відбуваються одночасно [2]. Тому на вхід сепаратора потрапляє газорідинний потік з встановленим визначеним розподілом крапель за розмірами $n_0(R)$, що має вигляд логарифмічно

нормального розподілу (рис. 4) [3]. При вході в області равликового вводу вузла попередньої сепарації з потоку природного газу вловлюються всі краплі з $R > R_m$, за результатами моделювань $2R_m=140-350$ мкм (рис. 4) (ділянка праворуч пунктирної лінії обмежена лінією розподілу OR). При вихровому русі в кільцевій області між обичайною корпусу сепаратора та трубою вбудованого відцентрового однопатрубкового сепаратора, а також при перегинанні газорідинного потоку для подальшого просування в область лопатково-аксіального завихрювача, крім краплин $R > R_m$, вловлюється також частина краплин в інтервалі розмірів $0 < R < R_m$ (ділянка ліворуч пунктирної лінії обмежена лініями розподілу OR та OR_m). Газорідинний потік, що пройшов ступінь попередньої сепарації від крупнодисперсних краплин рідини, потрапляє до відцентрового однопатрубкового сепаратора. У циклонному патрубку, який обладнаний лопатково-аксіальним завихрювачем та має горловину, від розподілу крапель відтинається додаткова частина (ділянка обмежена лінією розподілу OR_{m1}), що являє собою крупнодисперсну складову суміші ($2R_{m1}=65-150$ мкм). Крім того, застосуванням ежектора від

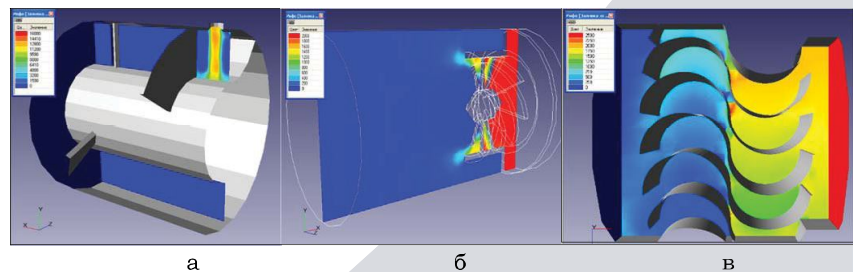


Рис. 2. Забарвлення за значеннями розподілу полів тисків P , Па, у відповідних розрахункових областях геометричних моделей сепараційних пристроїв газосепаратора

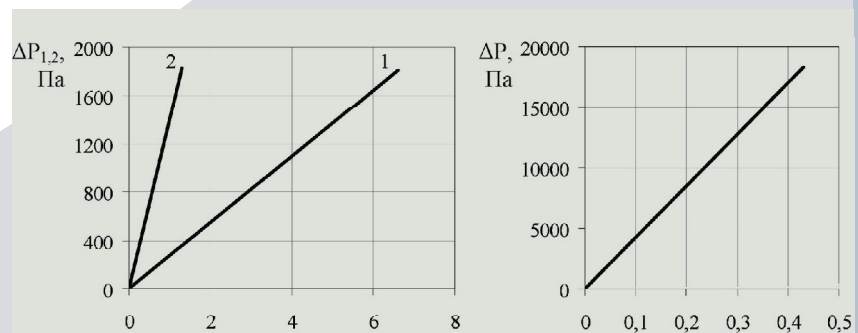


Рис. 3. Залежності гідравлічного опору відцентрового ΔP_1 , жалюзійного ΔP_2 ступенів та загальний ΔP газосепаратора відповідно від симплексу визначаючих параметрів газового потоку

сепарованої рідини досягається стабільне відведення вловлюваної рідини у вигляді плівки із стінки циклонної труби відцентрового однопатрубкового сепаратора до збірника рідини, по мірі його насичення, завдяки чому виключається можливість виходу пристрою на режими захлинання та вторинного унесення. Газорідний потік, що пройшов другу ступінь сепарації від крупнодисперсних краплин рідини, потрапляє до секції тонкого очищення. У блоці вертикальних криволінійних жалюзійних пластин (бризковловувач) від розподілу крапель відтинається додаткова частина (ділянка обмежена лінією розподілу OR_{m2}), що являє собою середньодисперсну складову суміші ($2R_{m2}=49-120$ мкм). Відведення вловлюваної рідини також відбувається у вигляді плівки із стінок криволінійних сепараційних каналів, утворених вертикальними криволінійними жалюзійними пластинами, по мірі насичення блоку бризковловувача. На виході з сепаратора залишається незначна частина розподілу високодисперсних краплин з $0 < R < R_{m2}$ ($2R=5-50$ мкм).

Лінії розподілу OR_m , OR_{m1} та OR_{m2} (рис. 4) побудовані за максимальними розмірами часток, які проскакують та видаляються з відповідних сепараційних пристроїв, і мінімальним розрахунковим значенням ефективності відповідних ступенів сепарації, тобто для «найгіршого» випадку в межах з досліджуваного діапазону зміни режимних параметрів роботи газосепаратора. З урахуванням відомої залежності сумарна ефективність газосепаратора η визначається:

$$\Delta P = \zeta \frac{v^2 \rho}{2\varphi^2} + \zeta_c \frac{v_c^2 \rho_c}{2(1-\varphi)^2}, \quad (2)$$

де $\eta_1, \eta_2 \dots \eta_i$ – коефіцієнти ефективності ступенів сепарації відповідно.

Фізична суть графічного зображення на рис. 4 полягає в тому, що обчислена як інтеграл площа зон між кривими розподілу за розмірами краплин конденсату та пароподібної вологи у потоці природного газу на вході відповідних ступенів сепарації відповідає ефективності сепарації η_i у відповідному сепараційному пристрої (рис. 5), а їх сумарна площа (площа зони обмеженої верхньою OR та нижньою OR_{m2} лініями розподілу) – сумарній

ефективності сепарації η газосепаратора (рис. 6).

Після обробки результатів моделювань процесів сепарації вуглеводневого газоконденсатного потоку в сепараційних пристроях апарату, отримано залежності для визначення коефіцієнтів ефективності відцентрового однопатрубкового сепаратора з лопатково-аксіальним завихрювачем η_1 та жалюзійного блока вертикальних криволінійних пластин з двох напівтруб η_2 від гідравлічного опору ΔP_1 та ΔP_2 , відповідних сепараційних пристроїв (рис. 2,3):

$$\eta_1 = 2,17 \ln(\Delta P_1), \quad (3)$$

$$\eta_2 = -2,05 \ln(\Delta P_2), \quad (4)$$

Адекватність поширення отриманих розрахункових залежностей (3) та (4) обмежується областю розвинутого турбулентного гідродинамічного режиму течії двофазного потоку ($Re \geq 10000$,

$v \leq 10$ м/с) при стаціонарних режимах роботи за відсутності залпових викидів рідини на вході (вміст краплинної рідини на вході $C \leq 225$ г/м³ для відцентрового та $C \leq 60$ г/м³ для жалюзійного блоків відповідно).

При візуальному аналізі та обробці отриманих характеристик складних тривимірних течій двофазного газоконденсатного потоку в розрахункових областях сепараційних елементів сепаратора з'ясовано, що для підвищення питомої продуктивності та зменшення гідравлічного опору відцентрового однопатрубкового сепаратора діаметр осевого обтічника лопатково-аксіального завихрювача рекомендовано прийняти рівним 0,2 діаметра завихрювача. Чисельними експериментами встановлено, що максимальна ефективність сепарації досягається при кутах встановлення лопаток лопатково-аксіального завихрювача 40-55° з перекриттям лопа-

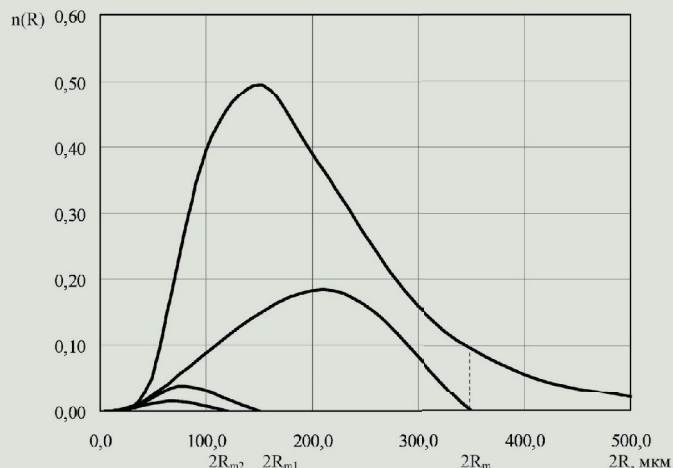


Рис. 4. Розподіл за розмірами $n(R)$ краплин конденсату та пароподібної вологи у потоці природного газу, що вловлюються сепараційними пристроями (ступенями сепарації) газосепаратора

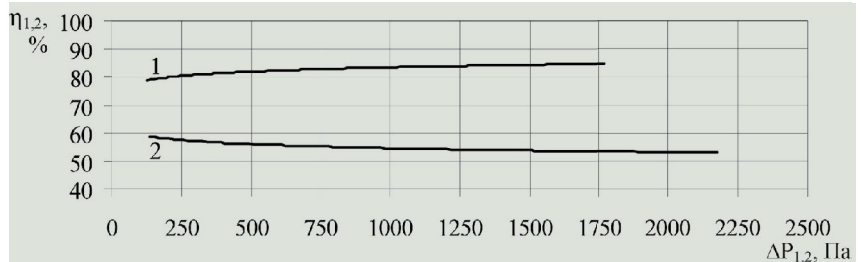


Рис. 5. Залежність ефективності відцентрового η_1 та жалюзійного η_2 сепараційних пристроїв від їх гідравлічного опору ΔP_1 та ΔP_2 відповідно

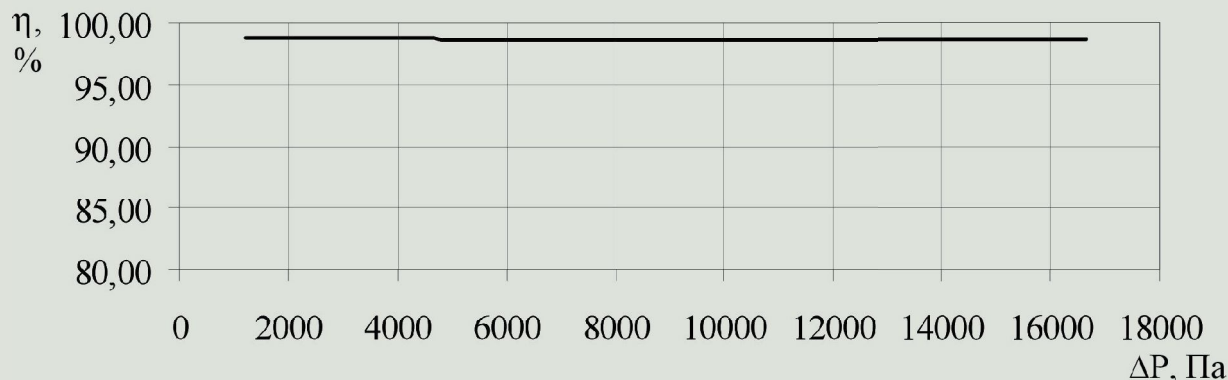


Рис. 6. Залежність сумарної ефективності η газосепаратора від його гідравлічного опору ΔP

тей 1,3-1,7. Більш рівномірний розподіл локальних швидкостей несучої фази у криволінійних міжжалюзійних сепараційних каналах та, відповідно, підвищення ефективності сепарації (за рахунок запобігання вторинному видаленню бризок внаслідок різкого стрибка швидкостей в міжжалюзійному сепараційному каналі у області зміни напрямку кривизни жалюзей з двох напівтруб) можна отримати внаслідок застосування синусоїдальної форми пластин у жалюзійному блоці [3]. Для підвищення здатності вловлювання (запобігання вторинного унесення, створення стабільного стікання вловленої рідини) та зниження гідравлічного опору на вході у вузлі попередньої сепарації та блоці вертикальних криволінійних жалюзійних пластин сепаратора пропонується застосувати захищені патентами рішення [4- 6], що у результаті підвищить значення питомої продуктивності й ефективності сепарації високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку.

У результаті моделювань з'ясовано, що досліджуваними конструкціями сепараційних пристроїв притаманні загальні недоліки. Здійснення безпосереднього контакту газового потоку та краплин або плівки вловленої рідини, застосування додаткових конструктивних особливостей, утворюючих зворотні струми завихрення, інтенсивне вихро- та хвилеутворення, що поряд з поліпшенням умов сепарації та відводу вловленої рідини, призводить до руйнування структури плівки рідини та унесення бризок, інтенсивність якого визначається швидкістю газового потоку. Так, зокрема, це стосується блоку вертикальних

криволінійних жалюзійних пластин з двох напівтруб, який в такому випадку не виконує свого призначення, як бризковловлювач, а є генератором високодисперсного туману (рис.4,5). Визначено, що в момент різкого підвищення швидкості потоку в міжжалюзійному сепараційному каналі у області зміни напрямку кривизни жалюзей бризковловлювача відбувається інтенсивне руйнування структури плівки рідини з утворенням високодисперсної складової (туману) газоконденсатної суміші (розмір утворених краплин $2R=5-70$ мкм), за якого газовим потоком підхоплюється до 50% (до 0,05 кг/с) вже відсепарованої рідини на цьому ступені й захоплюється з апарату у вихідний штуцер. При цьому підвищується гідравлічний опір, стає неможливим досягнення високого ступеня очищення, знижується значення здатності вловлювання, ефективності та питомої продуктивності газосепаратора. При стаціонарних режимах роботи за відсутності залпових викидів рідини на вході та наявного вторинного видалення бризок (внаслідок високоінтенсивних гідродинамічних режимів) ефективність досліджуваних інерційних сепараційних вузлів та газодинамічного сепаратора у цілому (97,0-99,8%) прямо залежить від їх гідравлічного опору (1200-16700 Па).

Список літератури:

1 Склабінський В.І. Високоєфективні інерційно-фільтруючі газосепаратори для промислових установок комплексної підготовки газу газових та газоконденсатних родовищ / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.В.Логвин, М.М.

Аль Раммахі // Проблеми та перспективи розвитку нафтогазового комплексу: тези міжнародної науково-практичної конференції. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – С.131-134.

2 Ляпощенко О.О. Підвищення ефективності сепараційного устаткування компресорних установок нафтогазової промисловості / О.О.Ляпощенко, В.І. Склабінський // Вісник Сумського державного університету, 2005. – №1(73). – С.58-68.

3 Ляпощенко О.О. Гідродинаміка інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв очищення природного газу: автореферат... канд. техн. наук, спец.: 05.17.08. – Суми: СумДУ, 2006. – 20 с.

4 Пат. на корисну модель №60742 У Україна, МПК В01Д 45/04. Спосіб очищення газів / Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Коробченко К.В., Парфіло Ю.Г. – №201015016; Заявлено 13.12.2010; Надрук. 25.06.2011, Бюл. №12, 2011.

5 Пат. на винахід №88558 С2 Україна, МПК В01Д45/04. Спосіб вловлювання дисперсної краплинної рідини з газорідного потоку і пристрій для його здійснення / Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Логвин А.В., Міщенко О.С. – №200802372; Заявлено 25.02.2008; Надрук. 26.10.2009, Бюл. №20, 2009.

6 Пат. на корисну модель №57386 У Україна, МПК В01Д45/04. Пристрій для вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку / Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Логвин А.В., Скиданенко М.С. – №201009488; Заявлено 29.07.2010; Надрук. 25.02.2011, Бюл. №4, 2011.