

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ГАЗОРІДИННОГО СЕПАРАТОРА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИК

М. М. Лях, В. В. Михайлюк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. +380978984786,
e-mail: myhajlyukv@ukr.net

Існує велике різноманіття газорідних сепараторів, що відрізняються за призначенням, конструкцією, принципом дії, видом привода тощо. Проте постійно відбувається їх вдосконалення: оптимізується конструкція, підвищується ефективність роботи. У статті пропонується конструкція газорідного сепаратора з перегородкою у вхідному патрубку. Наявність такого елемента дає змогу збільшити швидкість газового потоку. Це підвищує ефективність роботи, зменшує габаритні розміри сепаратора. Іншою особливістю даної конструкції є розташування диску із дефлектором безпосередньо у фланці сепаратора. Таке рішення усунуло необхідність проведення технологічних операцій із внутрішньою поверхнею корпусу сепаратора, що дало змогу зменшити його масу за рахунок мінімізації товщини стінки. З метою дослідження характеристик запропонованого сепаратора побудовано його тривимірну модель у програмі SolidWorks та проведено імітаційне моделювання. У результаті моделювання встановлено розподіл швидкостей та тисків потоку газорідної суміші у поздовжньому перерізі сепаратора і у перерізі вздовж осі вхідного патрубка. Визначено величину опору руху газорідної суміші, що створюється конструктивними елементами сепаратора. Оскільки одним із основних показників роботи сепараторів є ефективність їх роботи, то на основі проведеного імітаційного моделювання визначено ефективність запропонованої конструкції сепаратора, яка складає близько 100% при врахуванні різних діаметрів фракцій води у повітрі. Описані деякі терміни, що використовуються під час дослідження ефективності сепарації у модулі FlowSimulation програми SolidWorks. Наведено подальші плани на дослідження цього сепаратора з метою визначення його максимальної продуктивності у різних граничних умовах (витрати води, діаметрів краплин, впливу температури, різних робочих середовищ тощо).

Ключові слова: сепаратор, газовий потік, газорідна суміш, імітаційне моделювання, ефективність сепарації.

There are a variety of designs of gas-liquid separators, differing in purpose, construction, principle of operation, type of drive, and so on. However, they are constantly being improved: the design is optimized and the efficiency of operation is increased. In this paper, the design of a gas-liquid separator with a partition in the inlet is proposed. The presence of such an element allows to increase the gas flow rate. This increases the efficiency of operation and reduces the overall dimensions of the separator. Another feature of this design is the placement of the baffle directly in the flange of the separator. This solution eliminates the need for technological interventions on the inner surface of the separator body, which allows for weight reduction by minimizing the wall thickness. To study the characteristics of the proposed separator, a three-dimensional model was created in SolidWorks and a simulation was performed. As a result of the simulation, the distribution of velocities and pressures of the gas-liquid mixture was determined in the longitudinal section of the separator and in the section along the axis of the inlet pipe. The value of the resistance to the movement of the gas-liquid mixture generated by the structural elements of the separator was determined. Since one of the main indicators of separators is their efficiency, the efficiency of the proposed separator design was determined based on simulation modeling, which is about 100%, taking into account different diameters of water fractions in the air. Some terms used in the study of the separation efficiency in the FlowSimulation module of the SolidWorks program are described. Further plans are presented for the study of this separator to determine its maximum performance under different boundary conditions (water flow rate, droplet diameter, temperature, different working environments, etc.).

Key words: separator, gas flow, gas-liquid mixture, simulation modeling, separation performance.

Вступ

Сьогодні, напевне, неможливо вказати галузь промисловості, в котрій не використовується стиснене повітря, оскільки його використання має ряд переваг з технічної та економічної точки зору. Проте забезпечення підготовки стисненого повітря перед подачею на техноло-

гічне обладнання є надзвичайно актуальним завданням. Оскільки у повітрі чи іншому газі містяться механічні домішки, волога, краплини рідини, то для їх відокремлення і вилучення зазвичай застосовують різноманітне обладнання, зокрема сепаратори. Існує великий асортимент цих пристроїв, що відрізняються за прин-

ципом дії, конструкцією тощо. Проте, попри високу ефективність роботи, сепаратори постійно вдосконалюють. Завдяки сучасним комп'ютерним програмам можна проектувати сепаратори та досліджувати процеси, що у них відбуваються, оцінити ефективність роботи спроектованої моделі для різних умов роботи та внести необхідні зміни ще на стадії розроблення. На відміну від ручного розроблення з використанням складних розрахунків, що не дає змоги достатньою мірою врахувати особливості складних процесів сепарації, сучасні програми імітаційного моделювання досить швидко та точно справляються з таким завданням. Також за допомогою програм для імітаційного моделювання можливо проводити дослідження з врахуванням багатьох факторів, оптимізувати різноманітні параметри спроектованих сепараторів.

Аналіз закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій

Очищення газу від рідких та твердих домішок, розділення гетерогенних газорідких сумішей – найрозповсюдженіші процеси в нафто- і газовидобувній, нафтогазопереробній, хімічній та нафтохімічній, будівельній та інших галузях промисловості [1].

У роботі [2] аналізуються особливості процесу сепарації потоку двофазної газорідкої суміші, яка подається з підвідної труби в сепаратор. Краплі рідкої фази (конденсату) формуються в потоці, починаючи від джерела надходження і до самого входу в сепаратор. Для того, щоб оцінити ефективність роботи сепаратора, необхідно знати об'ємний вміст рідкої фази, середній радіус краплі та розподіл їх за розмірами. Вздовж шляху руху газу від джерела надходження до сепаратора тиск і температура неперервно змінюються. Під час руху порушується термодинамічна рівновага двофазної багатокомпонентної системи і відбувається масообмін між фазами [2].

Конденсація призводить до утворення дрібних крапель, розмір яких змінюється за рахунок конденсаційного росту в умовах перенасичення і коагуляції, а також подрібнення в потоці газу. Внаслідок цього в підвідній трубі перед сепаратором встановлюється розподіл крапель за розмірами, який характеризується: вмістом рідкої фази, середнім діаметром краплі та дисперсією розподілу.

Якщо перед сепаратором відсутній пристрій попередньої конденсації, то потік газу зі встановленим розподілом потрапляє в сепаратор, де відбувається розділення фаз. В цьому

випадку основними механізмами формування крапель в турбулентному потоці газу є процеси подрібнення і коагуляції, що протікають одночасно [2].

Основним параметром, який характеризує ступінь відділення рідини від газу в сепараторі, є коефіцієнт ефективності, рівний відношенню об'єму рідкої фази Q_{OC} , яка осідає в сепараторі, до об'єму рідкої фази Q_{BX} , яка міститься в потоці газу на вході в сепаратор:

$$\eta = \frac{Q_{OC}}{Q_{BX}}$$

Коефіцієнт ефективності η залежить від конструкції сепаратора, термобаричних умов, параметрів технологічної схеми, складу і фізико-хімічних властивостей газорідного потоку.

Донедавна нові конструкції сепараційного обладнання розробляли, базуючись на практичному досвіді попередніх дослідників, а також користуючись спрощеними математичними моделями. Такий підхід вимагав значних фізичних та економічних затрат та дуже часто не давав бажаного результату. В сучасних умовах розвитку комп'ютерної техніки, вирішення складних актуальних задач неможливо уявити без використання програмних комплексів, які дають можливість моделювати той або інший процес в апараті, вивчення якого є надзвичайно трудомістким. Широкого розвитку під час розроблення сепараційного обладнання набули програми, що реалізують метод скінченних об'ємів. Однією з таких програм є модуль програми SolidWorks – Flow Simulation. Теоретичні дослідження роботи сепараційного обладнання за допомогою Flow Simulation зводяться не лише до аналізу руху газового потоку з твердою фазою в робочій зоні апарату та розрахунку на основі одержаних даних оптимальної геометрії циклону, але й визначення основних технологічних характеристик роботи дослідного зразка – ефективності вловлювання частинок різних розмірів та гідравлічного опору [3].

Аналіз та узагальнення результатів теоретичних експериментів, які одержані для різних конструктивних та режимних параметрів роботи обладнання, дають підстави зробити висновок про те, що використання модуля Flow Simulation дозволяє: попередньо оцінити енергетичні затрати на процес очищення запиленних газів; проаналізувати траєкторію руху закрученого газового потоку в апараті та розробити практичні рекомендації щодо розроблення нового та модернізації існуючого сепараційного обладнання; дозволяє значно скоротити час та

затрати на розробку, проектування та експериментальні дослідження різноманітного сепаратійного обладнання [3].

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Мета роботи полягає у аналізі особливостей конструкції газорідинного сепаратора та дослідженні його характеристик.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- проаналізувати особливості конструкції сепаратора та побудувати його тривимірну модель;
- визначити характеристики сепаратора з допомогою імітаційного моделювання.

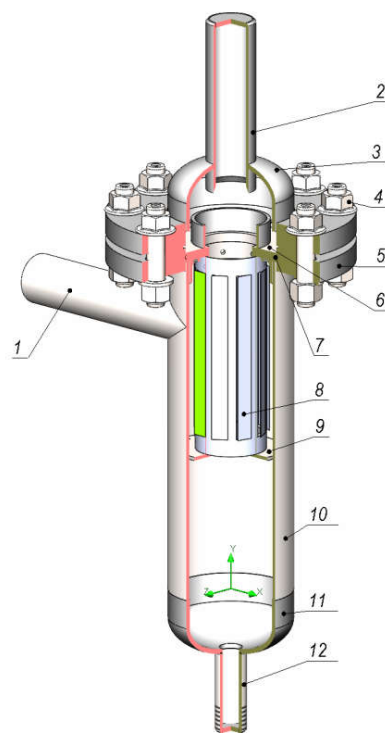
Викладення основного матеріалу

Широкого використання набули різноманітні газорідинні сепаратори, які відрізняються за конструкцією, принципом дії, продуктивністю тощо. Проте вимоги до роботи сепараторів та їх технічних характеристик постійно зростають. Одними із таких вимог є продуктивність сепаратора, ефективність його роботи, габаритні розміри та маса. До цих вимог можна додати спрощення технології та зменшення витрат на виготовлення.

У цій роботі пропонується конструкція газорідинного сепаратора, яка є дешевою та простою у виготовленні, має малу масу та просту конструкцію. Розглянемо конструкцію сепаратора детальніше (рис. 1). Для дослідження вибрано сепаратор з такими габаритними розмірами: висота – 630 мм; довжина – 250 мм; ширина – 215 мм. Внутрішній діаметр корпусу – 100 мм, товщина стінки корпусу – 3,5 мм, маса сепаратора – 15 кг.

Особливістю конструктивного виконання елементів сепаратора є те, що з метою забезпечення міцності його корпусу 10, диск 6 контактує з фланцем 5 (рис. 2). Таке рішення дало змогу не виконувати технологічних операцій на корпусі 10 (проточування внутрішньої поверхні для забезпечення необхідної посадки деталей) і, відповідно, не зменшувати товщину його стінки. Іншою особливістю конструкції є наявність перегородки А у входному отворі сепаратора (рис. 3). Це дозволяє збільшити швидкість газового потоку та спрямувати його на стінку корпусу. Також ця перегородка має плавний перехід до входу сепаратора.

Імітаційне моделювання запропонованого сепаратора проведено у FlowSimulation, яка є модулем програми SolidWorks.



- 1 – вхідний патрубок; 2 – вихідний патрубок;
 3 – еліптична кришка; 4 – шпилькове з'єднання;
 5 – фланець; 6 – диск; 7 – ущільнююче кільце;
 8 – дефлектор; 9 – диск центрувальний;
 10 – корпус; 11 – еліптичне днище;
 12 – штуцер зливу рідини

Рисунок 1 – Сепаратор запропонованої конструкції

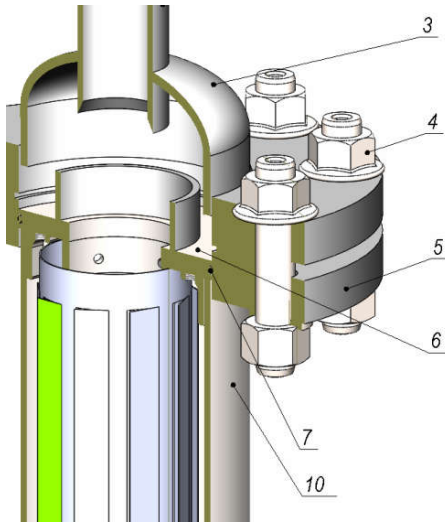
Вхідними даними до моделювання прийнято витрату газу, яка становить $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ та тиск на вході сепаратора, що рівний $0,2 \text{ МПа}$.

Розрахункова схема сепаратора наведена на рисунку 4. Для наочності окремі елементи сепаратора виконано прозорими.

Для отримання достовірніших результатів імітаційного моделювання роботи сепаратора було застосовано налаштування сітки скінченних об'ємів для окремих його елементів (рис. 5). Такими елементами прийнято вхідний 1 (в перерізі не показано) та вихідний 2 патрубки, дефлектор 8, корпус 10 та диск 6.

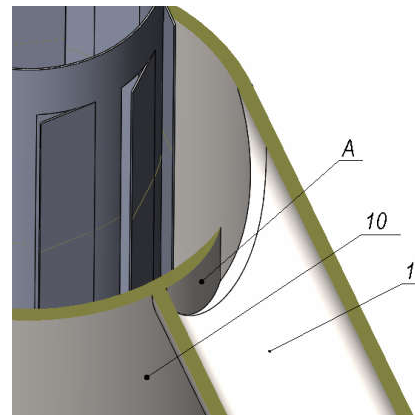
Результати імітаційного моделювання для робочого середовища сепаратора – "повітря" наведені на рисунках 6–9. Граничні значення параметрів, що відображаються на цих рисунках, є достовірними тільки для вказаних перерізів.

Для побудови графічних залежностей зміни швидкості та тиску газорідинного потоку у поперечному перерізі сепаратора вздовж осі вхідного патрубка використано попередньо виконану лінію (рис. 10), яка розміщена на відстані $0,5 \text{ мм}$ від стінок вхідного патрубка та



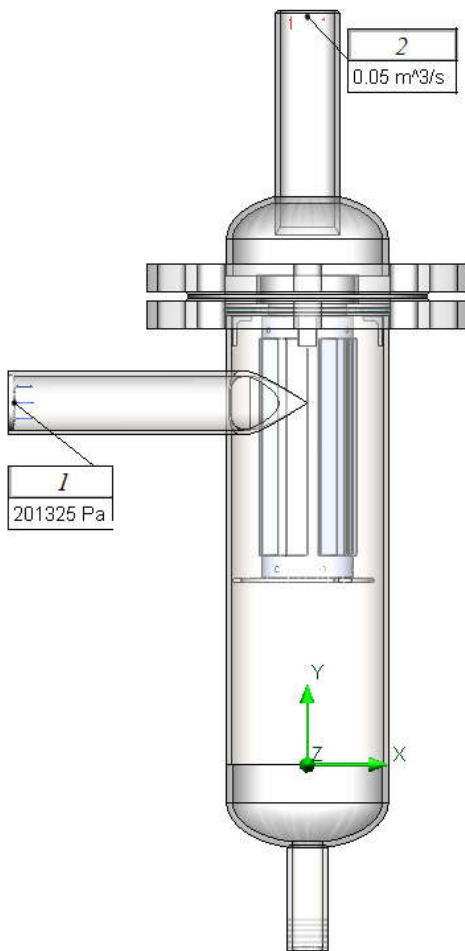
3 – еліптична кришка; 4 – шпилькове з'єднання; 5 – фланець; 6 – диск; 7 – ущільнююче кільце; 10 – корпус

Рисунок 2 – Конструкція верхньої частини сепаратора



1 – вхідний патрубок; 10 – корпус; A – перегородка

Рисунок 3 – Конструкція вхідної частини сепаратора



1 – тиск на вході;
2 – об'ємна витрата на виході
Рисунок 4 – Розрахункова схема

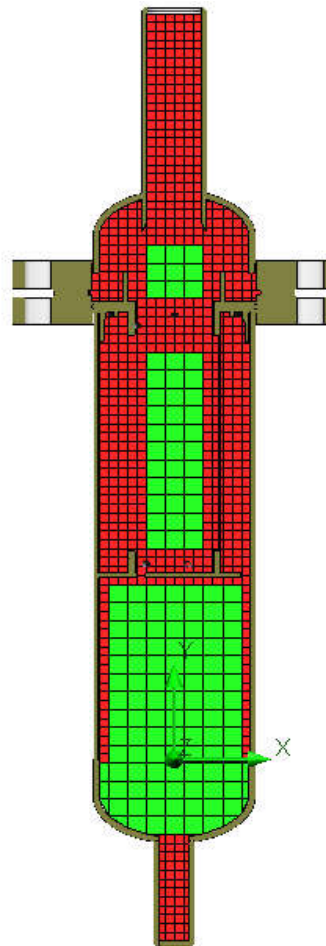


Рисунок 5 – Сітка скінченних об'ємів

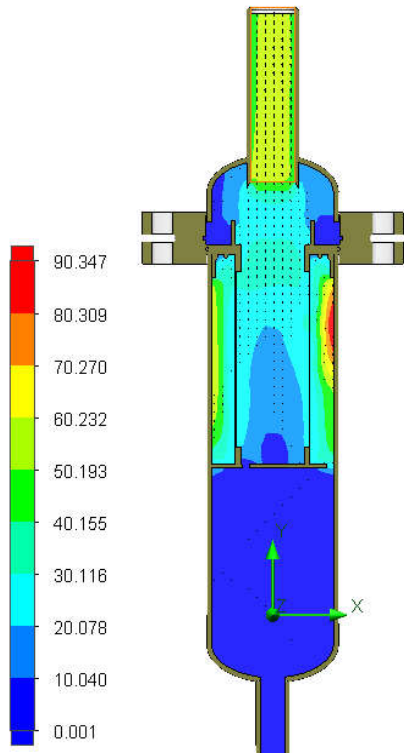


Рисунок 6 – Розподіл швидкості (м/с) у поздовжньому перерізі сепаратора

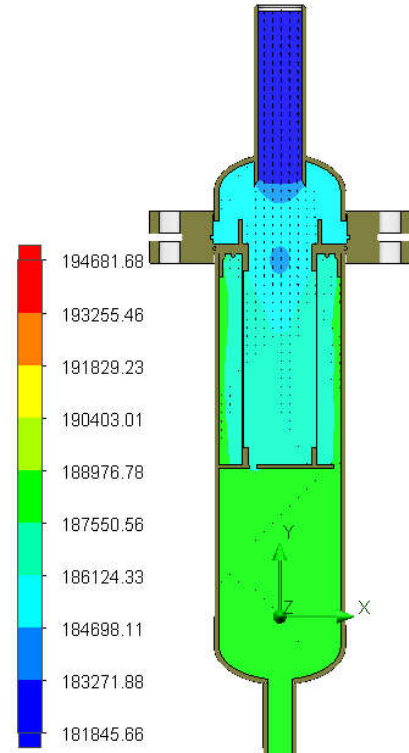


Рисунок 7 – Розподіл тиску (Па) у поздовжньому перерізі сепаратора

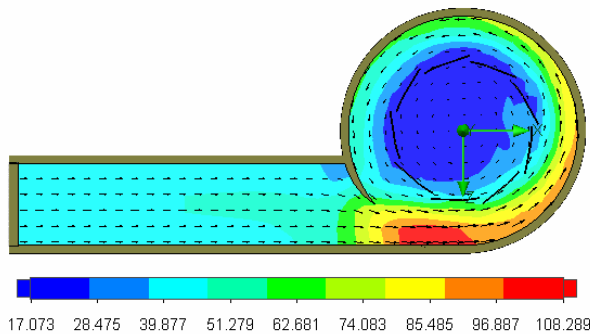


Рисунок 8 – Розподіл швидкості (м/с) у перерізі сепаратора вздовж осі вхідного патрубка

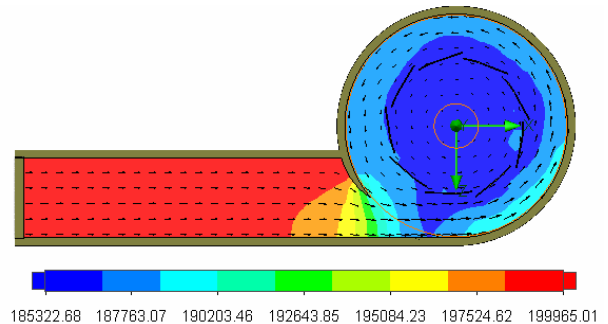


Рисунок 9 – Розподіл тиску (Па) у перерізі сепаратора вздовж осі вхідного патрубка

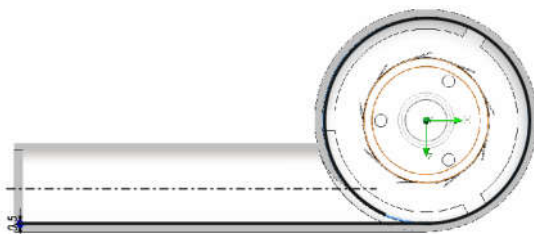


Рисунок 10 – Лінія для побудови графічних залежностей зміни швидкості та тиску газорідного потоку

корпусу. Це зроблено з метою отримання достовірніших результатів, оскільки швидкість потоку повітря буде зменшуватись з наближенням до стінок через їх шорсткість.

Побудовані графічні залежності зміни швидкості та тиску у перерізі сепаратора вздовж осі вхідного патрубка показані на рисунках 11 та 12.

Для визначення опору, що створює сепаратор при заданих граничних умовах, можна скористатися інструментами програми FlowSimulation – "Поверхневі параметри". Використавши вище згадані інструменти, встановлено, що величина тиску у вхідному патрубку сепаратора складає 201325 Па, у вихідному – 182051 Па. Отже, величина опору складає 19274 Па. Основним елементом, що обумовлює таку величну опору, є перегородка А (рис. 3). З одного боку, перегородка сприяє збільшенню

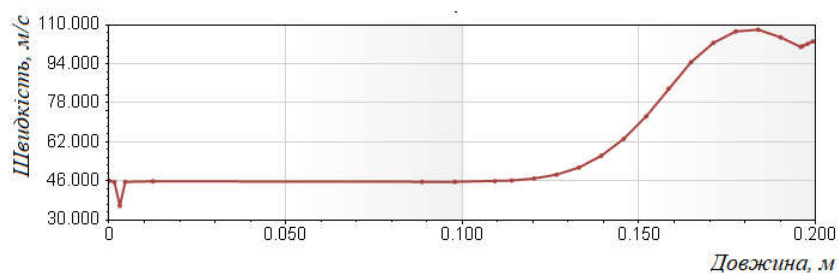


Рисунок 11 – Зміна швидкості у перерізі сепаратора вздовж осі вхідного патрубка

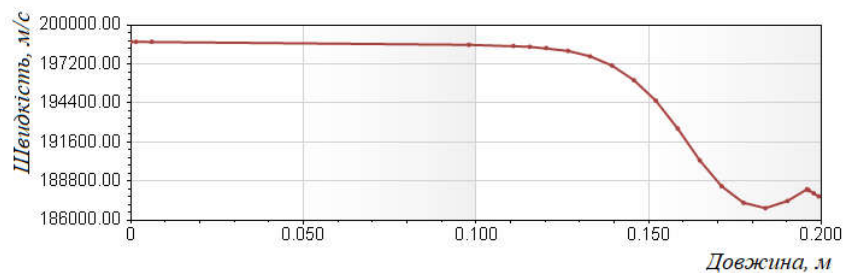


Рисунок 12 – Зміна тиск у перерізі сепаратора вздовж осі вхідного патрубка

швидкості потоку повітря, що є позитивним явищем, а, з іншого, гальмує потік (негативне явище). В подальших роботах буде приділена увага мінімізації цього негативного явища за рахунок використання додаткових елементів, що будуть розміщені у вхідному патрубку сепаратора.

Одним із основних показників сепаратора є його ефективність. Для її визначення використано модуль програми FlowSimulation – "Розрахунок руху частинок". Цей розрахунок частинок складається з таких етапів: задання фракцій частинок; встановлення фізичних параметрів частинок; задання умов на стінках; виконання необхідних налаштувань розрахунку.

При використанні цього модуля було застосовано такі фізичні моделі, як гравітація, налипання та ерозія. Варта зауважити, що гравітація задається з допомогою компонента вектору гравітаційного прискорення у глобальній системі координат.

У модулі "Розрахунок руху частинок" варта задати необхідний тип граничних умов на стінці та відповідні значення параметрів. Існує три варіанти:

- прилипання – в цьому випадку частинки прилипають до стінок (така поведінка характерна для частинок рідини);
- ідеальне відбиття – частинки відбиваються від стінки (така поведінка характерна для частинок твердого тіла);
- відбиття враховує нормальний e_n та тангенційний e_t коефіцієнти відновлення. Ці коефіцієнти – це відношення абсолютних значень

нормальної компонент швидкості $\left(e_n = \frac{V_{2,n}}{V_{1,n}} \right)$ і, відповідно, відношення абсолютних значень тангенційної компонент $\left(e_t = \frac{V_{2,t}}{V_{1,t}} \right)$ до і після зіткнення частинок з поверхнею (рис. 13).

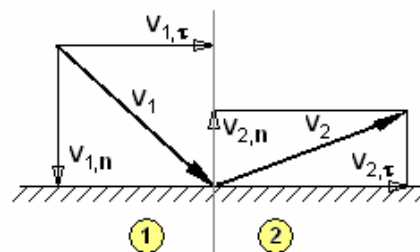


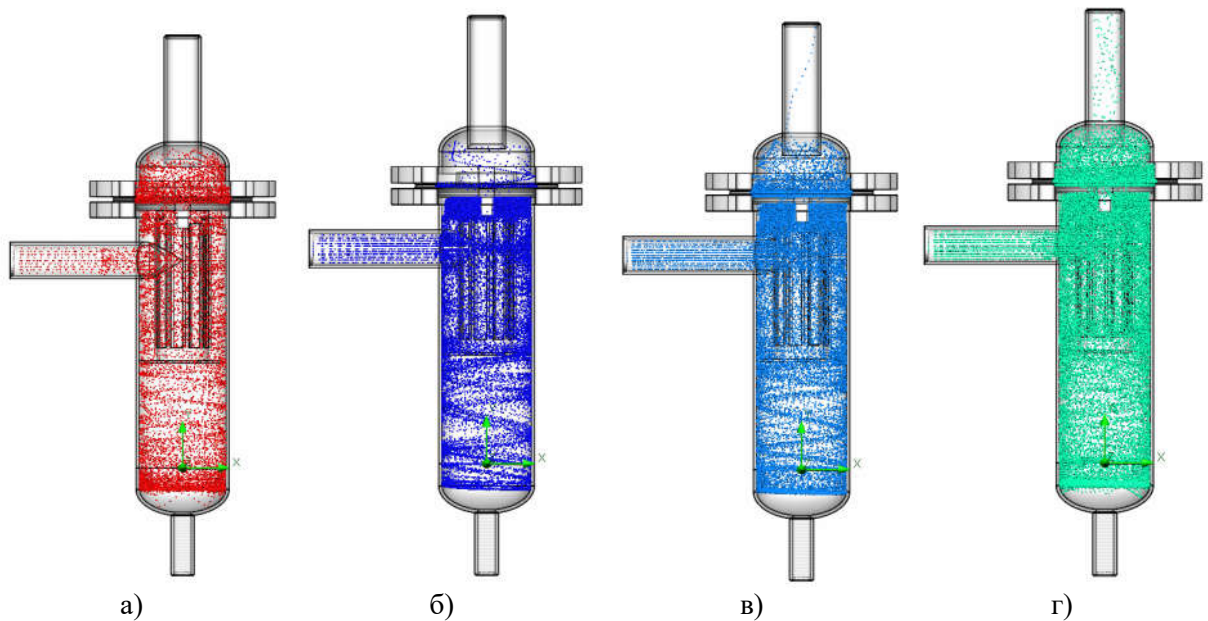
Рисунок 13 – Розподіл швидкостей частинки до (1) і після (2) зіткнення з поверхнею

Вхідними даними для визначення ефективності сепаратора прийнято:

- діаметри крапель (фракції) води: 0,2 мм, 0,1 мм, 0,05 мм та 0,025 мм;
- масова витрата – 0,006 кг/с.

У результаті імітаційного моделювання встановлено, що коефіцієнт ефективності сепаратора складає близько 100 % для вказаних граничних умов. Траєкторії руху різних фракцій води показано на рисунку 14.

В подальшому сепаратор буде досліджено з метою визначення його максимальної продуктивності для різних граничних умов (витрати, діаметрів краплин, впливу температури, різних робочих середовищ тощо).



а) – 2 мм; б) – 1 мм; в) – 0,5 мм; г) – 0,25 мм

Рисунок 14 – Траєкторії руху фракцій води

Висновки

У статті запропоновано конструкцію газорідного сепаратора, побудовано її тривимірну модель у програмі SolidWorks для подальшого встановлення характеристик шляхом імітаційного моделювання.

Особливостями пропонованої конструкції газорідного сепаратора є розташування диска із розміщеним на ньому дефлектором безпосередньо у фланці. Таке рішення дало змогу не виконувати технологічних операцій на корпусі сепаратора (проточування внутрішньої поверхні для забезпечення необхідної посадки деталей) і, відповідно, не зменшувати товщину його. Іншою особливістю є наявність у входній частині корпусу сепаратора перегородки, що забезпечує збільшення швидкості газорідної суміші.

За допомогою імітаційного моделювання, проведеного у модулі FlowSimulation, встановлено величини та графічні залежності зміни тиску і швидкості газорідного потоку та ефективність його роботи з врахуванням різних фракцій краплин рідини.

Література

1. Михайлюк В. В., Фафлей О. Я., Мельник В. О., Захара І. Я., Малишев А. Р., Процюк Г. Я. Моделювання газового вертикального сіткового сепаратора. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2022. № 1(52), С. 91–100. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-91-100](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-91-100)

2. Лях М.М., Юр'єв Е.В., Вакалюк В.М., Солоничний Я.В. Математична модель сепарації газорідної суміші в сепараторі інерційного типу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2008. № 1. С. 67-73.

3. Майструк В.В., Гаврилів Р.І., Попіль А.С., Басистий А.М. Оцінка енергозатрат при роботі прямотечійного циклону за допомогою програмного пакету FLOW SIMULATION. *Восточно-Европейський журнал передових технологій*. 2012. Вип. 6/8(60). С. 28-30.

References

1. Mykhailiuk V. V., Faflei O. Ya., Melnyk V. O., Zakhara I. Ya., Malyshev A. R., & Protsiuk H. Ya. Modeliuvannya hazovoho vertykalnoho sitkovoho separatora. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2022. No 1(52), P. 91–100. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-91-100](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-91-100) [in Ukrainian]

2. Liakh M.M., Yuriev E.V., Vakaliuk V.M., Solonychnyi Ya.V. Matematychna model separatsii hazoridynnoi sumishi v separatori inertsiihnoho typu. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2008. No 1. P. 67-73. [in Ukrainian]

3. Maistruk V.V., Havryliv R.I., Popil A.S., Basisty A.M.. Otsinka enerhozatrnat pry roboti priamotechiinoho tsyklonu za dopomohoiu prohramnoho paketu FLOW SIMULATION. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologii*. 2012. Vol. 6/8(60). P. 28-30. [in Ukrainian]