

ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛЬЦЕВОГО АДСОРБЕРА

В. В. Михайлюк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. 0978984786,
e-mail: myhajlyukv@ukr.net

Парникові гази, зокрема вуглекислий, впливають на клімат та призводять до підвищення температури повітря. Одним із джерел, що продукує викиди вуглекислого газу в атмосферу, є виробництво цементу – найпоширенішого будівельного матеріалу. Для уловлювання вуглекислого газу сьогодні застосовують різні технології, які, зазвичай, є складними та високовартісними (наприклад, розділення газу за допомогою мембран). У статті пропонується для уловлювання вуглекислого газу застосовувати процес адсорбції та розглядається адсорбер, який, порівняно із іншими типами, має такі переваги: вищу продуктивність, менші габаритні розміри, більшу ефективність. З метою дослідження характеристик кільцевого адсорбера побудовано тривимірну модель та проведено імітаційне моделювання його роботи із врахуванням складу газової суміші, її термодинамічних параметрів, продуктивності та пористості адсорбенту. Особливістю моделювання є те, що для пришвидшення розрахунку використано сектор адсорбера, оскільки його конструкція є осесиметричною. Для підвищення точності результатів моделювання оптимізовано сітку скінченних елементів. Встановлено, що за такої конструкції адсорбера розподіл швидкості газового потоку в шарі адсорбенту нерівномірний. Найбільша швидкість газового потоку спостерігається на вході та виході з шару адсорбенту, а посередині шару адсорбенту – швидкість найрівномірніша, навіть за різної його пористості. Встановлено, що із зменшенням пористості адсорбенту швидкість руху газового потоку зростає. В подальших дослідженнях за допомогою імітаційного моделювання буде оптимізовано конструкцію кільцевого адсорбера із врахуванням розмірів адсорбенту, витрати та складу газового потоку, його термодинамічних параметрів.

Ключові слова: цементне виробництво, вуглекислий газ, адсорбер, адсорбент, імітаційне моделювання, газовий потік.

Greenhouse gases, in particular carbon dioxide, affect the climate and lead to an increase in air temperature. One of the sources that produces emissions of carbon dioxide into the atmosphere is the production of cement – the most common building material. Today, various technologies are used to capture carbon dioxide, which are usually complex and expensive (for example, gas separation using membranes). The article proposes to use the adsorption process for capturing carbon dioxide and considers an adsorber, which, compared to other types, has the following advantages: higher productivity, smaller overall dimensions, higher efficiency. In order to study the characteristics of the ring adsorber, a three-dimensional model was built and a simulation of its operation was carried out, taking into account the composition of the gas mixture, its thermodynamic parameters, productivity and porosity of the adsorbent. A feature of the simulation is that the adsorber sector is used to speed up the calculation, since its design is axisymmetric. To increase the accuracy of simulation results, the mesh of finite elements is optimized. It was established that with such an adsorber design, the gas flow rate distribution in the adsorbent layer is uneven. The gas flow has the fastest speed at the adsorbent's entrance and exit, and the speed is most uniform in the middle of the adsorbent layer, even with varying porosity. It has been demonstrated that as the porosity of the adsorbent decreases, the rate of gas flow increases. In future research, the design of the ring adsorber will be optimized using simulation modeling, taking into account the adsorbent size, the flow rate and composition of the gas stream, and its thermodynamic properties.

Key words: cement production, carbon dioxide, adsorber, adsorbent, simulation modeling, gas flow.

Вступ

Викиди парникових газів, зокрема вуглекислого (CO₂), впливають на клімат, можуть призвести до підвищення температури повітря та зміни напрямку вітрів. Найбільше викидів CO₂ продукують такі країни, як Китай (24 %) та Сполучені Штати Америки (18 %). У світовому рейтингу з продукування вуглекислого газу Україна займає 29 місце [1]. Згідно з даними океанографічного інституту Скріппс (Scripps

Institution) концентрація CO₂ у повітрі перевищила 415 ppm. Це призводить до глобального потепління в результаті парникового ефекту. Відповідно до Кіотського протоколу та пізніше підписаних Паризьких домовленостей, промислово розвинені країни повинні зменшувати об'єм викидів парникових газів у середньому на 5,2% на рік. Для попередження парникового ефекту необхідно знизити вміст CO₂ до рівня, що існував у доіндустріальну епоху –350 ppm.

Тому актуальними є розвиток технологій уловлювання, переробки та утилізації CO₂ з метою зменшення його шкідливого впливу [1, 2].

Для зниження вмісту CO₂ в атмосфері сьогодні використовують технології уловлювання і зберігання вуглецю. Завдяки цим технологіям можна зменшити викиди вуглекислого газу в атмосферу, а також транспортувати і перекачувати його в підземні сховища для зберігання [3].

Цементна галузь є однією із таких, що продукує велику кількість викидів CO₂ у атмосферу. Оскільки сьогодні цемент є одним із найпоширеніших будівельних матеріалів, то надзвичайно важливим питанням залишається розроблення та впровадження технологій для уловлювання вуглекислого газу із димових газів цементних виробництв.

Для уловлювання вуглекислого газу можуть застосовуватися різні технології: абсорбція, адсорбція, хімічне циклічне горіння, розділення газу на мембрані та отримання газових гідратів.

Детальніше розглянемо уловлення вуглекислого газу за технологією адсорбції.

Основні аспекти цього процесу:

- вибір адсорбенту;
- розроблення та оптимізація конструкції адсорбера;
- оптимізація процесу адсорбції (для максимальної ефективності уловлювання CO₂ важливо оптимізувати процес роботи адсорбера, забезпечуючи належну температуру, тиск та інші параметри);
- регенерація адсорбенту.

Зважаючи на те, що технологія уловлювання вуглекислого газу шляхом адсорбції є простою, дешевою та ефективною, слід звернути увагу на її дослідження та удосконалення.

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Характерною особливістю процесу адсорбції є вибірковість і зворотність. Завдяки зворотності процесу можливим є поглинання з газових сумішей одного або декількох компонентів, а потім (за певних умов) виділення їх із адсорбенту.

Адсорбція використовується у різних галузях промисловості для очищення та осушування газів, очищення та освітлення розчинів, розділення парогазових сумішей тощо. Адсорбція газу на твердих поверхнях використовується у деяких галузях промисловості для очищення технологічних газових потоків для запобігання викиду шкідливих речовин у атмосферу [5].

У таких апаратах адсорбентами є тверді речовини, які мають велику внутрішню поверхню поглинання. Зараз переважно застосовують такі адсорбенти як, активоване вугілля, силікагель, цеоліти тощо.

Адсорбери поділяються на три групи: з нерухомим, з рухомим та з псевдозрідженим шаром адсорбенту [5].

Адсорбери з нерухомим шаром адсорбенту – це вертикальні апарати, заповнені гранульованим адсорбентом. Після насичення адсорбенту стадія адсорбції завершується, і він піддається регенерації.

Адсорбери з рухомим шаром адсорбенту – апарати, у верхній частині яких відбувається адсорбція, а у нижній – десорбція. Для циркуляції адсорбенту в системі застосовують пневмотранспорт.

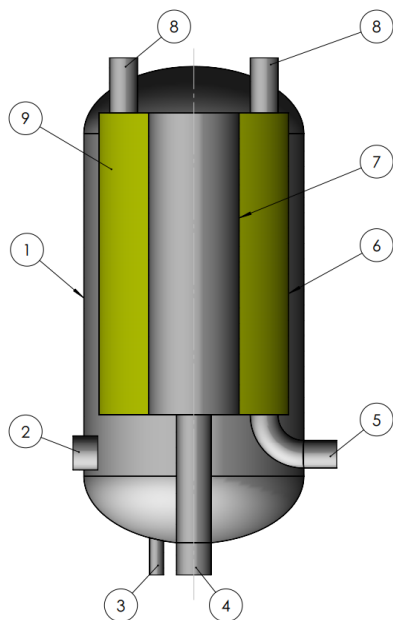
У адсорберах із псевдозрідженим шаром адсорбенту процес адсорбції відбувається безперервно через декілька шарів розміром не більше 500 мкм. В таких адсорберах газ рухається протитоком вгору.

Отже, для процесу адсорбції застосовують адсорбери різних конструкцій, що обумовлюється їх механічною міцністю, хімічною стійкістю, здатністю до регенерації тощо. Існують також адсорбери періодичної та безперервної дії. Зазвичай адсорбційні процеси є періодичними.

Адсорбери періодичної дії бувають вертикальними, горизонтальними, кільцевими, з теплообмінними елементами тощо [5]. У вертикальному адсорбері відношення висоти шару адсорбента до діаметра апарату є більшим одиниці. Конструкції таких апаратів є доволі різноманітними. Зазвичай такі апарати складаються із циліндричного корпусу, який зверху та знизу закритий кришками, патрубків для підведення та відведення газу та адсорбенту. Шар адсорбенту розміщується на газорозподільній решітці, яка має велику кількість отворів малого поперечного перерізу. У горизонтальних адсорберах довжина, діаметр та висота шару адсорбенту досягають відповідно 6, 2 та 0,8..1,0 м. Велика площа перерізу горизонтальних адсорберів за малої висоти шару та наявності кулеподібних ділянок призводить до нерівномірного розподілу газового потоку. Конструкції горизонтальних адсорберів рекомендовано застосовувати для очищення великої кількості газу за низьких вимог до його якості.

У випадку очищення газів від окремих елементів, що наявні у невеликих концентраціях, застосовують кільцеві адсорбери. Умовна конструкція такого апарату показана на рисун-

ку 1. Всі його елементи монтують в корпусі 1. Газ, що піддається очищенню, подається через патрубок 2 у зовнішню частину адсорбера, далі він рухається у горизонтальному напрямі через кільцевий шар адсорбенту, що знаходиться між внутрішньою 7 та зовнішньою 6 циліндричними решітками, і далі виводиться через патрубок 4. На стадії осушування та охолодження вказаний напрям руху газового потоку зберігається.



1 – корпус; 2 – патрубок для подачі газу; 3 – патрубок для відведення парів при десорбції; 4 – патрубок для відведення газу та подачі пари; 5 – люк для вивантаження адсорбенту; 6, 7 – решітки; 8 – люки для завантаження адсорбентів; 9 – адсорбент

Рисунок 1 – Кільцевий адсорбер

За однакових габаритних розмірів продуктивність кільцевого адсорбера в межах 25% вища, порівняно із вертикальним адсорбером [5].

Перевагами уловлювання вуглекислого газу із використанням адсорбентів є підвищена селективність, низькі затрати (в порівнянні з іншими способами), а також можливість роботи у різних умовах. Однак, як і в будь-якій технології, існують технічні та економічні перепони, такі як необхідність вибору оптимальних матеріалів адсорбенту, оптимізації процесів адсорбції та конструкції обладнання, забезпечення економічної доцільності.

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Мета роботи полягає у дослідженні кільцевого адсорбера шляхом імітаційного моделювання для визначення його характеристик.

Для досягнення мети необхідно:

- розробити конструкцію кільцевого адсорбера та побудувати її 3D-модель;
- провести імітаційне моделювання роботи кільцевого адсорбера із врахуванням складу газової суміші, її термодинамічних параметрів, продуктивності та пористості адсорбенту;
- проаналізувати результати імітаційного моделювання та окреслити подальші дослідження.

Викладення основного матеріалу

Поряд з перевагами кільцевого адсорбера у нього є суттєвий недолік – великі внутрішні об'єми, які не приймають участі у процесі адсорбції. Для усунення цих недоліків у роботі [6] було запропоновано конструкцію кільцевого адсорбера, а також покращено розподіл швидкості руху газового потоку у шарі адсорбенту.

Використовуючи конструкцію [6], побудовано 3D-модель кільцевого адсорбера (рис. 2).

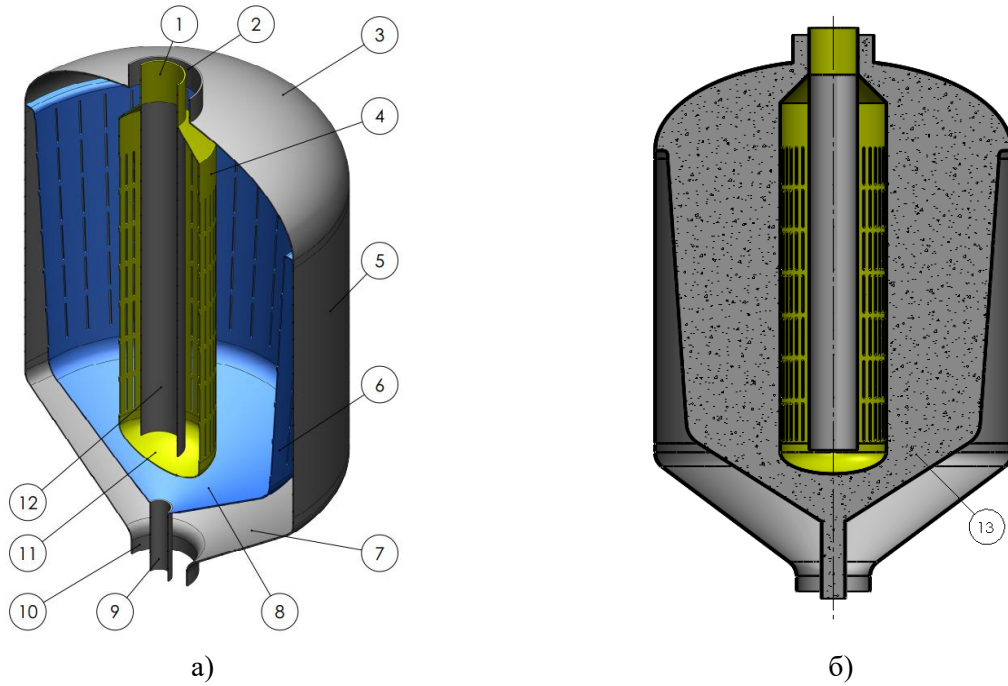
Оскільки конструкція адсорбера є осесиметричною, то для її дослідження методом скінченних елементів у налаштуваннях розрахункової області вибрано параметр "осьова періодичність". Це дозволяє проводити дослідження тільки вибраного сектора (рис. 3), що пришвидшує вирішення задачі. Розрахункова область (сектор) підібрана таким чином, що по її центру проходять щілини внутрішньої перфорованої труби 4 та щілини внутрішньої конічної перфорованої труби 6.

Для підвищення точності отриманих результатів оптимізовано сітку скінченних елементів (рис. 4).

Для імітації адсорбенту застосовано інструмент програми "Пористі середовища" [7]. У даному випадку пористість – це ефективна пористість середовища, яка визначається як відношення об'єму, який займають пори, до загального об'єму пористого середовища. Пористість визначає швидкість руху потоку в каналах пористого середовища. Швидкість руху газового потоку, у свою чергу, впливає на час перебування газів у адсорбері, тобто на ефективність роботи адсорбера.

Під час імітаційного моделювання роботи адсорбера у програмі FlowSimulation розглядалось три величини пористості адсорбенту: 0,25; 0,5; 0,75 та використовувався тип його проникності – "Isotropic".

Граничні умови для дослідження адсорбера прийнято у відповідності до рекомендацій [7]: на вході адсорбера масова витрата газової суміші (0,25 кг/с), на виході з нього – статичний тиск. Також враховано температуру газової



а) б)
 1 – патрубок виходу газового потоку; 2 – патрубок завантаження адсорбенту; 3 – кришка;
 4 – внутрішня перфорована труба; 5 – корпус; 6 – внутрішня конічна перфорована труба;
 7 – конічне днище адсорбера; 8 – конічне днище внутрішньої конічної перфорованої труби;
 9 – патрубок відвантаження адсорбенту; 10 – патрубок входу газового потоку;
 11 – еліптичне днище внутрішньої перфорованої труби; 12 – труба; 13 – адсорбент

Рисунок 2 – 3D-модель кільцевого адсорбера

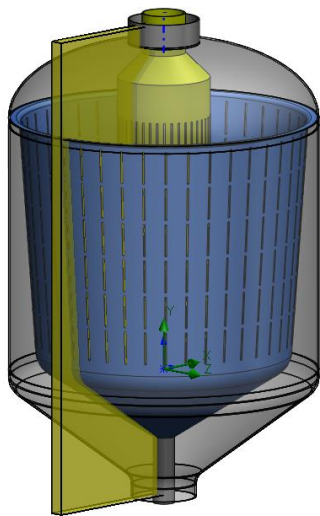


Рисунок 3 – Сектор розрахункової області

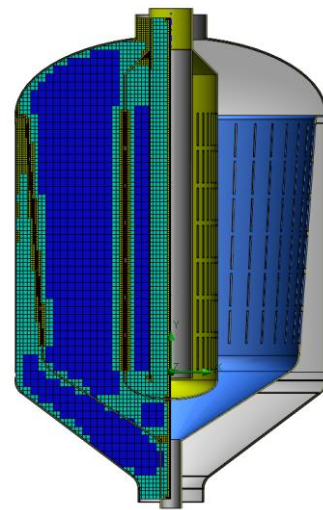


Рисунок 4 – Сітка скінченних елементів

суміші: на вході у адсорбер – 70 °С, при виході газової суміші у навколишнє середовище – 20 °С.

Згідно з [8] концентрація газів у газовій суміші цементних виробництв становить: 28% азоту; 11% водяної пари; 22% вуглекислого газу; 9% кисню; 30 % повітря.

Для зручності аналізу результатів проведеного імітаційного моделювання на середній площині розрахункової області (рис. 3) побудо-

вано три контрольні лінії (рис. 5), по яких будуватимуться графічні залежності зміни контрольних параметрів.

На рисунках 6-8 показано розподіл швидкостей у поздовжньому перерізі адсорбера за різних величин пористості адсорбенту.

На рисунках 9-11 показано графічні залежності зміни швидкостей руху газового потоку по контрольних лініях (рис. 5).

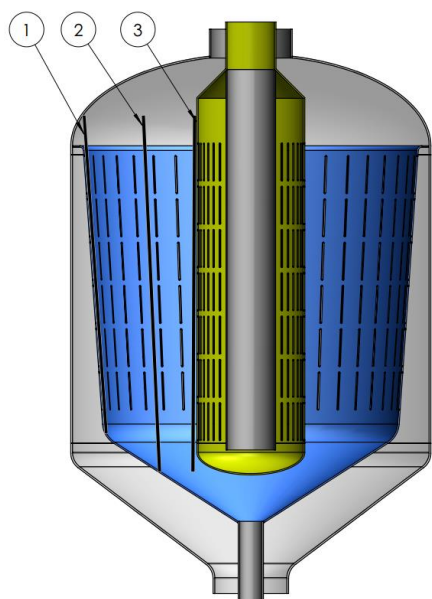


Рисунок 5 – Контрольні лінії (1, 2, 3) для побудови графічних залежностей

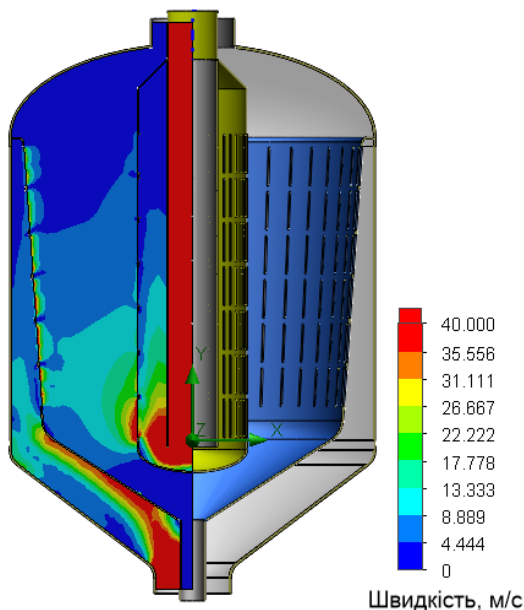


Рисунок 6 – Розподіл швидкості у поздовжньому перерізі адсорбера (пористість адсорбенту 0,25)

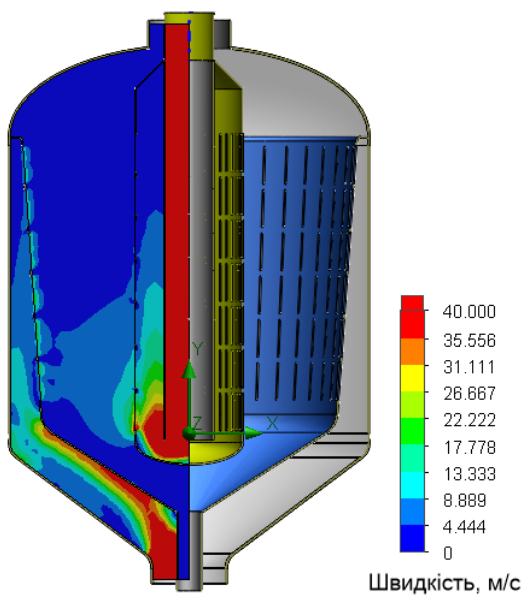


Рисунок 7 – Розподіл швидкості у поздовжньому перерізі адсорбера (пористість адсорбенту 0,5)

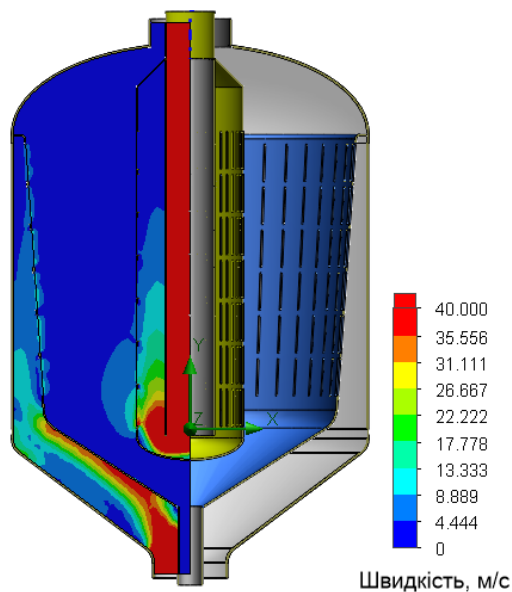


Рисунок 8 – Розподіл швидкості у поздовжньому перерізі адсорбера (пористість адсорбенту 0,75)

Аналізуючи результати, отримані за допомогою імітаційного моделювання, можна зробити висновки, що розподіл швидкості газового потоку через шар адсорбенту є нерівномірним. Найбільша нерівномірність спостерігається на вході газового потоку у шар адсорбенту та на виході з нього. Посередині шару адсорбенту швидкість газового потоку, навіть за різної пористості, є найрівномірнішою.

Також варто зауважити, що із зменшенням пористості адсорбенту відбувається зростання швидкості газового потоку і, як наслідок, збільшення опору його руху. У подальших дослідженнях буде оптимізовано конструкцію адсорбера для забезпечення рівномірності швидкості руху газового потоку на вході та виході із шару адсорбенту із врахуванням різних величин адсорбента, витрати та складу газового потоку, зміни його термодинамічних параметрів.

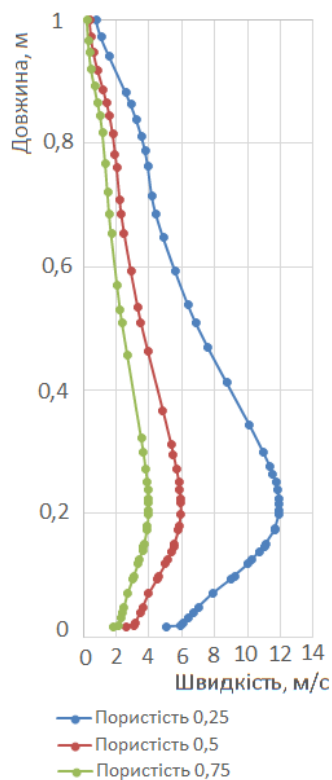


Рисунок 9 – Зміна швидкості руху газового потоку по контрольній лінії 1

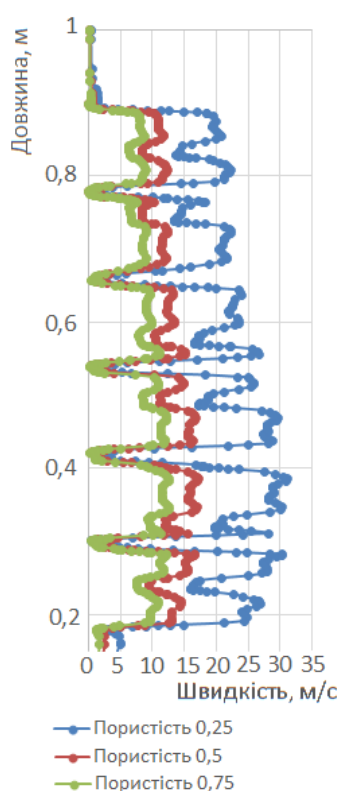


Рисунок 10 – Зміна швидкості руху газового потоку по контрольній лінії 2

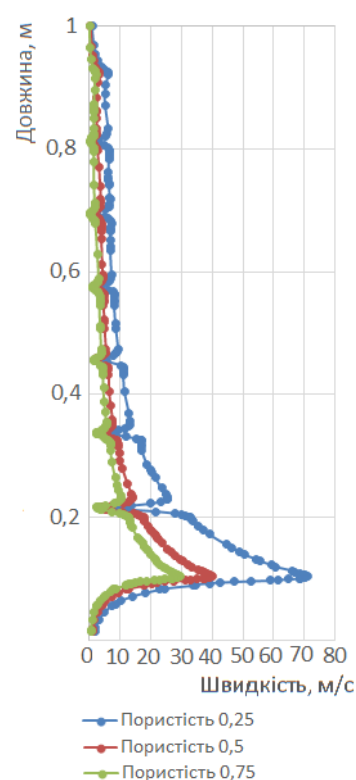


Рисунок 11 – Зміна швидкості руху газового потоку по контрольній лінії 3

Висновки

За результатами аналізу відомих конструкцій адсорберів для реалізації поставленої мети було надано перевагу кільцевому адсорберу та розроблено його 3D-модель. Така конструкція, порівняно із іншими, має менші габаритні розміри за рахунок оптимального розміщення внутрішніх елементів та їх форм.

Для визначення характеристик кільцевого адсорбера проведено імітаційне моделювання його роботи із врахуванням складу газової суміші, її термодинамічних параметрів, продуктивності та пористості адсорбента.

Згідно з аналізом отриманих результатів імітаційного моделювання роботи адсорбера встановлено, що за такої конструкції адсорбера розподіл швидкості газового потоку на вході та виході з шару адсорбенту є нерівномірним, що знижує ефективність роботи адсорбенту. Тому в подальших дослідженнях буде оптимізовано конструкцію адсорбера за рахунок зміни його геометричних параметрів із врахуванням різних величин пористості адсорбента, витрати та складу газового потоку, зміни термодинамічних параметрів.

Література

1. CO₂. Earth is live!! Daily CO₂. [Online]. URL: <https://www.co2.earth/daily-co2>. Accessed on: July 28, 2020.
2. Global Carbon Atlas. CO₂ emissions. [Online]. URL: <http://www.globalcarbonatlas.org/ru/CO2-emissions>. Accessed on: July 28, 2020.
3. Кіт Уїрпскі Уловлювання та зберігання вуглецю: Українські перспективи для промисловості та забезпечення енергетичної безпеки. Осло, Норвегія: Беллона, 2013.
4. Лук'янихін В. О., Зубко К. Ю. Еколого-економічний вплив на довкілля використання природних і штучних матеріалів у будівництві. Економіка будівництва і міського господарства. Київ: Наука, 2011. 172 с.
5. Поджарський М.А. Теоретичні основи процесів сорбції: Конспект лекцій. Д.: РВВ ДНУ, 2007. 40 с.
6. Radial bed vacuum/pressure swing adsorber vessel: pat. 97112520.8 EUROPEAN PATENT APPLICATION: IPC B01D 53/047, EP 0 820 798 A2; заявл. 22.07.1997; опубл. 28.01.1998 Bulletin 1998/05

7. https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/590120/mod_resource/content/0/Uchebnik_Solid_Works_Flow_Simulations_2009.pdf

8. Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва. Цементна промисловість / С.В. Плашихін. К.: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2020. 96 с.

References

1. CO2. Earth is live!! Daily CO2. [Online]. URL: <https://www.co2.earth/daily-co2>. Accessed on: July 28, 2020

2. Global Carbon Atlas. CO2 emissions. [Online]. URL: <http://www.globalcarbonatlas.org/ru/CO2-emissions>. Accessed on: July 28, 2020

3. Kit Uiriski Ulovliuvannia ta zberihannia vuhletsiu: Ukrainski perspektyvy dlia promy?lovosti ta zabezpechennia enerhetychnoi bezpeky. Oslo, Norvehiia: Bellona, 2013.[in Ukrainian]

4. Lukianykhin V. O., Zubko K. Yu. Ekoloho-ekonomichnyi vplyv na dovkillia vykorystannia pryrodnykh i shtuchnykh materialiv u budivnytstvi. Ekonomika budivnytstva i miskoho gospodarstva. Kyiv: Nauka, 2011. 172 p. [in Ukrainian]

5. Podzharskyi M.A. Teoretychni osnovy protsesiv sorbtzii: Konspekt leksii. D.: RVV DNU, 2007. 40 p. [in Ukrainian]

6. Radial bed vacuum/pressure swing adsorber vessel: pat. 97112520.8 EUROPEAN PATENT APPLICATION: IPC B01D 53/047, EP 0 820 798 A2; zaiavl. 22.07.1997; opubl. 28.01.1998 Bulletin 1998/05.[in Ukrainian]

7. https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/590120/mod_resource/content/0/Uchebnik_Solid_Works_Flow_Simulations_2009.pdf

8. Dovidnyk z resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva. Tsementna promyslovist / S.V. Plashykhin. K.: Tsentr resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva, 2020. 96 p. [in Ukrainian]