

УДК 504.5:665.6

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ANSYS CFX ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ГАЗОВОГО ПОТОКУ В РЕАКЦІЙНОЇ КАМЕРІ ПРИ ОТРИМАННЯ СОРБЕНТУ НА ОСНОВІ ТЕРМОРОЗЩЕПЛЕНОГО ГРАФІТУ

Ф.І.Кірчу, канд.техн.наук, доцент, О.Ф. Нікулін, д-р техн.наук, А.І.Кодрик, канд.техн.наук, Тітенко О.М.*, канд.техн.наук, Мороз О.І.

Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 16.11.2019

Пройшла рецензування: 12.12.2019

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

терморозширений графіт, реакційна камера, моделювання процесу, газодинаміка, газовий потік, інжектор, поля швидкості та температури.

АНОТАЦІЯ

Робота присвячена дослідженню можливостей використання методів чисельної газодинаміки для оптимізації і оцінки впливу конструктивних характеристик реакційної камери для отримання терморозщепленого графіту, як сорбенту для ліквідації наслідків розливу нафтопродуктів на водній поверхні, на його експлуатаційні характеристики. При розрахунках використовувалася стандартна SST модель турбулентної в'язкості реалізованості в програмному комплексі ANSYS 12. Результати моделювання дозволили домогтися стійкої роботи ежектора, за допомогою якого графіт вводиться в реакційну камеру. Виявлена необхідність перепрофілювання реакційної камери для забезпечення більш стійкого вихрового течії всередині її, з метою забезпечення сепарації розщепленого і нерозщепленого графіту, збільшення часу проходження реакції розширення і створення рівномірного теплового поля в реакторі, що дозволило зменшити щільність і підвищити сорбційну здатність терморасширенного графіту.

Постановка проблеми.

Для ліквідації плівок нафти на поверхні води застосовують поглинання нафти за допомогою фізико-хімічних методів з використанням сорбентів, серед яких унікальним являється сорбент на основі терморозщепленого графіту (далі – ТРГ). Важливою експлуатаційною характеристикою сорбенту є його сорбційна здатність, яка вимірюється відношенням кількості нафти поглиненої одним грамом сорбенту [1]. Її значення залежить від технології отримання терморозщепленого графіту, а саме - створення рівномірного теплового поля в реакторі з його отримання та часу проходження реакції терморозщеплення.

Недоліком ТРГ є надзвичайно низька його густина: 2.4 кг/м^3 , що приводить до відчутних труднощів при транспортуванні ТРГ до місця аварії. Принциповим вирішенням цієї проблеми є створення мобільних установок, які б виробляли ТРГ по місцю аварії. Але такі установки потребують спеціальних реакторів з відповідними технологічними параметрами та геометричними габаритами. Ефективним підходом при прийнятті конструктивних рішень є попереднє моделювання теплофізичних процесів розщеплення графіту з використанням програмного комплексу ANSYS CFX, як найбільш потужного з існуючих на сьогоднішній день інструментів чисельного моделювання газодинамічних процесів. Створення адекватної

математичної моделі процесу терморозщеплення графіту, з використанням методів чисельної газодинаміки, дозволить виявити вплив як конструктивних так і технологічних параметрів процесу на експлуатаційні характеристики сорбенту що є актуальним при створенні та використанні обладнання для його продукування.

Аналіз публікацій

Нафта і нафтопродукти є одним з найсильніших забруднюючих факторів навколишнього середовища. Забруднення викликаються прямими розливами нафтопродуктів, скиданням промивальних і баластних вод у море, внаслідок виникнення аварійних ситуацій на морських свердловинах, транспортних трубопровідних системах і нафтоналивних суднах [1,2].

Вивчення ролі та природи поверхні дисперсних частинок у процесах змочування та структуроутворення [3] дає підстави для висновку, що спосіб сорбційної очистки, що відноситься до вказаних вище фізико-хімічних способів ліквідації забруднень, пов'язаних з антропогенними рідинами, а особливо з вуглеводневими сполуками має певні переваги у порівнянні з очисткою диспергаторами [4]. Раціональність використання сорбентів [5] і розвитку технологій для їх отримання [5, 6] саме для цих завдань очистки довкілля від вуглеводневих сполук підтверджується значним збільшення виробництва

високоякісних [7], іноді досить дорогих, сорбентів такими іноземними компаніями, як: “Chemviron Carbon”, “Norit”, “Sutcliffe Speakman Carbon”. В літературі відсутні дані щодо використання моделювання теплофізичних процесів розщеплення графіту з використанням програмних комплексів

Мета роботи.

Обґрунтування конструктивних параметрів мобільної установки з отримання ТРГ та оптимізації технології його продукування за допомогою математичної моделі з використанням методів чисельної газодинаміки.

Викладення основного матеріалу.

Сучасна обчислювальна газодинаміка займається розробкою таких актуальних напрямків, як розрахунок рухів в'язкої рідини (газу), чисельне дослідження течій газу з фізико-хімічними перетвореннями, вивчення поширення ударних хвиль в особистих середовищах. В найбільш загальному випадку для завдання газової динаміки потрібно вирішити систему з чотирьох

незалежних рівнянь, яка носить назву системи рівнянь Нав'є-Стокса: рівняння нерозривності (збереження маси), рівняння кількості руху (збереження імпульсу), рівняння енергії (збереження енергії), рівняння стану. Система рівнянь Нав'є-Стокса утворюють закінчену математичну модель поведінки рідини (газу), детально і строго описує практично весь спектр течій, а саме:

- рівняння нерозривності, що відповідає закону збереження маси :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

де V_x, V_y, V_z - компоненти вектора швидкості в напрямках x, y і z відповідно; ρ - щільність; x, y, z - глобальні декартові координати; t - час.

- закон збереження імпульсу, що зв'язує напруги і швидкість деформації рідини для трьох напрямків, у вигляді рівнянь Нав'є-Стокса:

$$\frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_e \frac{\partial V_x}{\partial z} + T_x, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu_e \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_e \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_e \frac{\partial V_y}{\partial z} + T_y, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_z)}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \mu_e \frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_e \frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_e \frac{\partial V_z}{\partial z} + T_z, \quad (4)$$

де: g_x, g_y, g_z - компоненти вектору прискорення вільного падіння в напрямках x, y і z , відповідно; μ_e - ефективна в'язкість; T_x, T_y, T_z

- компоненти вектору вузьких втрат в напрямках x, y і z , відповідно.

$$T_x = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial V_z}{\partial x} \quad (5)$$

$$T_y = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial V_z}{\partial y} \quad (6)$$

$$T_z = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial V_z}{\partial z} \quad (7)$$

Ефективна в'язкість враховує ламінарну в'язкість M (яка визначається властивостями

рідини) і турбулентну в'язкість Mt : (яка розраховується за моделлю турбулентності)

$$\mu_{\Sigma} = \mu + \mu_t \quad (8)$$

Для опису турбулентності була використана SST модель (Shear Stress Transport Model) (двошарова модель Ментера), яка поєднує в собі переваги як стандартної k-ε моделі, так і k-ω моделі.

- рівняння закону збереження енергії, представлене у вигляді термічного транспортного рівняння:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C_p V_x T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_p V_y T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho C_p V_z T)}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v, \quad (9)$$

де T - температура; Qv - об'ємні джерела тепла; k - теплопровідність; Cp - питома теплоємність.

В рамках оціночного розрахунку технологічних параметрів реакційної камери було проведено моделювання потоку газу по усій його траєкторії руху всередині робочого простору. Для розрахунку використовували пакет ANSYS CFX, як найбільш потужний з існуючих на сьогоднішній день, інструмент чисельного моделювання газодинамічних процесів [7,8].

З метою послідовного наближення розрахунку до реальних фізичних процесів на даному (попередньому) етапі моделювати подача гарячого газу в робочу зону камери без окисленого графіту(ОГ). У розрахунку аналізували тільки поля розподілу швидкостей основного газу при температурах реального процесу, і поля розподілу швидкостей транспортного повітря який використовується для подачі ОГ.

Об'єкт досліджень і формалізація задач.

Як об'єкт дослідження використовувалася реакційна камера барабанного типу. Подача порошку ОГ здійснювалось в напрямку перпендикулярному напрямку потоку через бічний патрубок на циліндричній частині камери (рис. 1).

Допущення і обмеження:

- моделювання здійснювалось з використання стиснутої моделі ідеального газу;
- теплообмін через стінки камери з навколишнім середовищем відсутній;
- моделювання здійснювалось без подачі порошку ОГ, замість нього подавалось повітря (з початковою температурою 300°K) в обсязі еквівалентному ОГ (по відібраному теплу).
- горіння паливоповітряного середовища не враховувалось (на вхід камери подавався газ з

температурою 1500°K).

- граничні умови типу "opening" (T = 300°K, P = 0 Па - надлишковий тиск). Ця умова задавалась для визначення тиску на патрубок підведення графіту.

- гранична умова типу "inlet" с завданням витрати повітря і його температури.

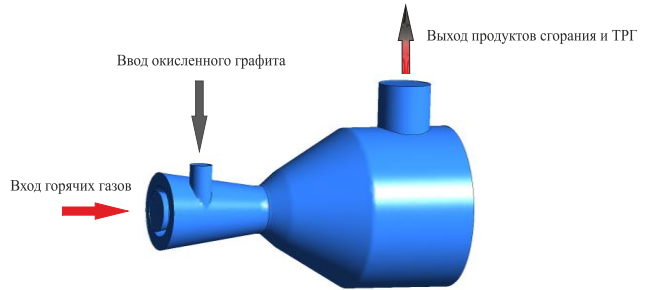


Рисунок 1– Загальний вигляд реакційної камери

Розрахункова модель і граничні умови

Розрахункова область складалася з 3-D моделі реакційної камери (рис.1) з накладеними граничними умовами. Модель камери розбивали на кінцеві обсяги з згущенням сітки в пристінкових областях за допомогою програми ICEM CFD. Сітка за своєю структурою - тетраедрична (рис.2) з середньою загальною кількістю елементів від 2 млн. При розрахунках використовувалася стандартна SST модель турбулентної в'язкості реалізована в програмному комплексі ANSYS 12.

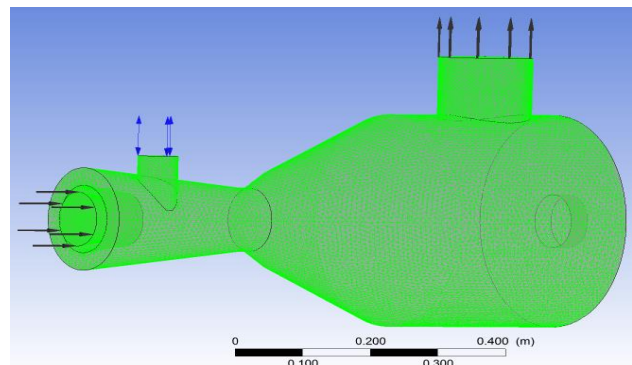


Рисунок 2 – Розрахункова сітка

Граничні умови визначалися на всіх поверхнях розрахункової області і включали умови на твердих стінках, на вході і на виході, граничні умови на твердих стінках були визначені з умови прилипання потоку до гладкої адіабатичної стінки $u_{cm} = v_{cm} = w_{cm} = 0$.

Граничними умовами на вході 1 (пальниковий вхід) була повна температура T

=1500° K, і швидкість газového потоку. На вході 2 (вхід порошку ОГ) повна температура $T = 300^{\circ}\text{K}$ і витрата газу.

Граничні умови на виході з дифузора задавалися з екстраполяцією всіх параметрів за параметрами на вході «вільний вихід», при $P = 0$ Па - надлишковий тиск. При розрахунках використовувався матричний алгоритм «coupled» з неявній схемою рішення рівнянь газовой динаміки реалізований в програмному комплексі ANSYS 12. Критерієм збіжності було досягнення неузгодженості на рівні 10^{-5} .

Програма ANSYS видає результати у різній формі. Найбільш наочною є кольорова картина розподілу параметра. На наведених нижче малюнках показані кольорові картини розподілу швидкості (м/с) газového потоку в різних частинах робочого простору реакційної камери. Шкала змінюється від синього (мінімум) до червоного (максимум).

Поперечний зріз картини швидкості потоку по усій довжині робочого простору камери показаний на рис. 3, межі зміни швидкості від 0 до 46 м/с.

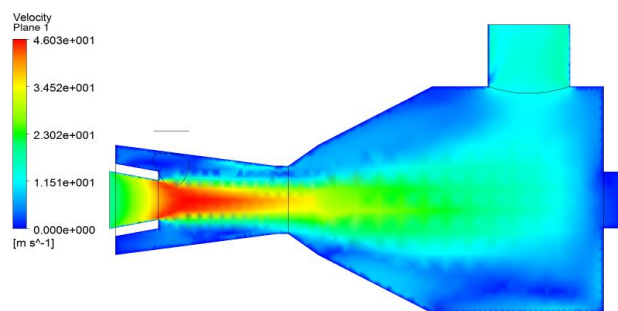


Рисунок 3 – Зміна швидкості потоку вздовж проточної частини камери

В області входу спостерігається стійке витікання затопленого гарячого струменя з ростом швидкості (рис. 3). Розгін газového потоку в сопловій частини ежектора сприятливо впливає на ежекційну здатність. При цьому в патрубку подачі графіту відбувається зниження статичного тиску (рис.4), що сприятливо позначається на подачі графіту.

Поле розподілу температури - рівномірне (рис. 5). Це сприятливо позначається на термоударі який отримує ОГ поміщений в камеру.

Поле розподілу температури - рівномірне (рис. 5). Це сприятливо позначається на термоударі який отримує ОГ поміщений в камеру.

Поле розподілу температури - рівномірне (рис. 5). Це сприятливо позначається на термоударі який отримує ОГ поміщений в камеру.

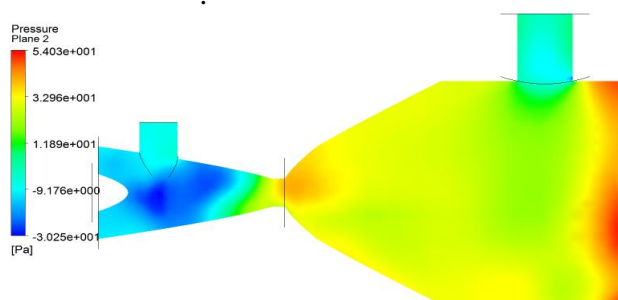


Рисунок 4 – Розподіл статичного тиску в реакційній камері

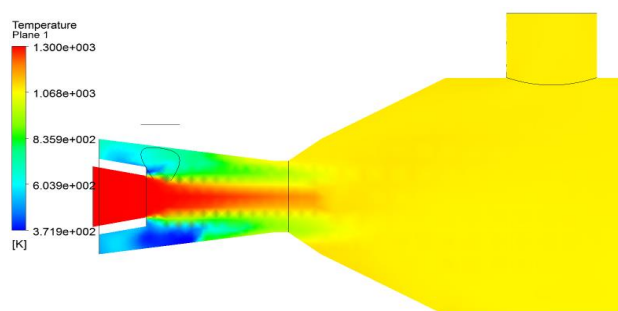


Рисунок 5 – Розподіл статичної температури в реакційній камері

З рис.6 видно, що лінії газového струму мають досить складну несиметричну структуру. Графіт у камері буде знаходитися тривалий час [9], що призведе до забезпечення необхідного термоудару для максимального терморозщеплення.

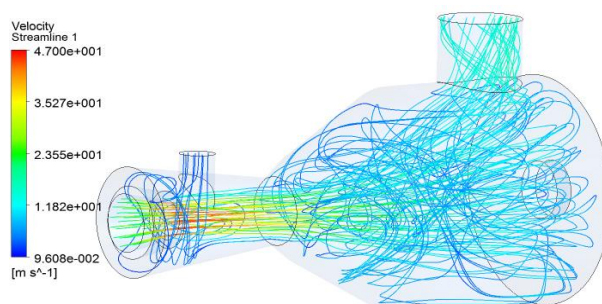


Рисунок 6 – Розподіл ліній струму в реакційній камері

Висновки

1. За допомогою пакету комп'ютерного газодинамічного аналізу ANSYS CFD 12 виявлено шляхи перепрофілювання конструкції реактора мобільної установки для створення більш стійкої вихрової течії всередині камери з метою забезпечення сепарації розщепленого і нерозщепленого графіту, створення рівномірного теплового поля у реакторі та збільшення часу

проходження реакції терморозщеплення, що приводить до стабільного отримання сорбенту з підвищеними експлуатаційними властивостями.

2. Отримано оптимальне розподілення термодинамічних параметрів газового потоку, що дозволяє підвищити сорбційну здатність отриманого терморозщепленого графіту до 85-90 г/г, що збільшує ефективність його використання при ліквідації розливів нафтопродуктів на водних та ґрунтових поверхнях.

3. Результати моделювання дозволили обґрунтувати параметри ежектора, за допомогою

якого підводиться графіт в реакційну камеру, тим самим підвищити надійність функціонування мобільних установок для вироблення сорбенту при ліквідації розливів нафтопродуктів на водних та ґрунтових поверхнях.

4. За допомогою моделювання реакторної камери мобільної установки були отримані визначальні енергетичні та геометричні параметри, на основі яких приймаються конструктивні рішення при її розробці

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. А.І. Кодрик, М.О. Нікулін. З питання утилізації нафтових забруднень на водній поверхні та під водою// Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2013. – Вип.2(28). – С. 35–383.
2. Паховчишин С.В. Роль природи поверхні дисперсних частинок у процесах змочування та структуроутворення. Автореферат дисертації доктора хімічних наук. К. ІБКХ НАН України, 2000 р., 36 с
3. Тітенко О.М. Удосконалення способу вироблення сорбенту нафтопродуктів в умовах ліквідації аварійних розливів /О.Ф. Нікулін, Н.Я. Недбаєв, О.І. Мороз, О.М. Тітенко// Монографія. Безпечна вода. Ч. 1, Szkoła Główna na Żołnierzach (Polska), 2015. - С. 96-111.
4. Ammonium nitrate explosive composition containing vermicular low density expanded graphite [Текст]: US3260632, C01B31/04/ Franciszek Olstowski, Minderhout James R,Oliver Osborn, Patrick Frank D., 18.06.1964, 12.07.1966.

REFERENCES

1. A.I. Kodrik, M.O. Nikulin. Z pitanja utilizacii naftovih zabrudnen' na vodnij poverhni ta pid vodoju// Naukovij visnik UkrNDIPB. – 2013. – Vip.2(28). – S. 35–383.
2. Pahovchishin S.V. Rol' prirodi poverhni dispersnih chastinok u procesah zmochuvannja ta strukturoutvorennja. Avtoreferat disertacii doktora himichnih nauk. K. IBKH NAN Ukraïni, 2000 r., 36 s
3. Titenko O.M. Udokonalennja sposobu viroblennja sorbentu naftoproduktiv v umovah likvidacii avarijnih rozliviv /O.F. Nikulin, N.Ja. Nedbaev, O.I. Moroz, O.M. Titenko// Monografija. Bezpechna voda. Ch. 1, Szkoła Główna na Żołnierzach (Polska), 2015. - С. 96-111.
4. Ammonium nitrate explosive composition containing vermicular low density expanded graphite [Text]: US3260632, C01B31/04/ Franciszek Olstowski, Minderhout James R,Oliver Osborn, Patrick Frank D., 18.06.1964, 12.07.1966.
5. Method of producing a graphite intercalation compound. [Tekst]: US4350576C25B 1/00 (20060101); C25B 001/00 ;

5. Method of producing a graphite intercalation compound. [Текст]: US4350576C25B 1/00 (20060101); C25B 001/00 ; C25B 001/22; Watanabe; Nobuatsu (Nagaokakyo, JP), Kondo; Teruhisa (Toyonaka, JP), Ishiguro; Jiro (Suita, JP), , , 14.12.1979, 12.12.1980.
6. Thermally Exfoliated Graphite. [Текст]: US 2007/0092432; C01B 31/04 (2006.01) Robert K. Prud'Homme, Ilhan A. Aksay, Douglas Adamson, Ahmed Abdada; Filed: Oct.14, 2005; Pub.Date: Apr.26,2007.
7. Басов К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS. М.: ДМК Пресс, 2006.
8. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005.
9. Тітенко О.М. Математична модель теплових витрат в технології отримання терморозширеного графіту / О.М. Тітенко// Вісник АМУ, серія «Техніка». - Київ: Вид. АМУ, 2014. № 1 (7). - С.128-135.

5. Method of producing a graphite intercalation compound. [Текст]: US4350576C25B 1/00 (20060101); C25B 001/00 ; C25B 001/22; Watanabe; Nobuatsu (Nagaokakyo, JP), Kondo; Teruhisa (Toyonaka, JP), Ishiguro; Jiro (Suita, JP), , , 14.12.1979, 12.12.1980.
6. Thermally Exfoliated Graphite. [Tekst]: US 2007/0092432; C01B 31/04 (2006.01) Robert K. Prud'Homme, Ilhan A. Aksay, Douglas Adamson, Ahmed Abdada; Filed: Oct.14, 2005; Pub.Date: Apr.26,2007.
7. Basov K.A. Graficheskij interfejs kompleksa ANSYS. M.: DMK Press, 2006.
8. Basov K.A. ANSYS: spravochnik pol'zovatelja. M.: DMK Press, 2005.
9. Titenko O.M. Matematichna model' teplovih vitrat v tehnologii otrimannja termorozshireno go grafitu / O.M. Titenko// Visnik AMU, serija «Tehnika». - Kiïv: Vid. AMU, 2014. № 1 (7). - S.128-135

APPLICATION OF ANSYS CFX SOFTWARE FOR MODELING OF GAS FLOW MOVEMENT IN A REACTION CHAMBER WHEN SORBENT IS OBTAINED ON THE BASIS OF THERMALLY EXPANDED GRAPHITE

F. Kirchu, Cand. of Sc. (Eng.), A. Nikulin, Doc. of Sc. (Eng.), A. Kodryk, Cand. of Sc. (Eng.), O. Titenko, Cand. of Sc. (Eng.), O. Moroz

The Ukrainian Civil Protection Research Institute, Ukraine

KEYWORDS

exfoliated graphite reaction chamber, process modeling, gas dynamics, gas flow, injector, velocity field and temperature

ANNOTATION

The work is devoted to the description of technology of evaluation of the characteristics of the reaction chamber for obtaining thermally expanded graphite, as a sorbent for oil products, using methods of numerical gas dynamics based on the use of the ANSYS - 12 software complex. The purpose of this study is to optimize the geometric and thermal parameters of the reaction chamber, which provides the maximum degree of thermal expansion of oxidized graphite.

The following assumptions and limitations were used in the calculations: simulation was performed using a compressed ideal gas model, a standard SST turbulent viscosity model was used, there is no heat exchange through the walls of the chamber with the environment, the simulation was carried out without the supply of expanded graphite powder, instead of supplying air (with an initial temperature of 300 ° K) in the amount equivalent to graphite to calculate the equal value of heat absorption, the chemical reaction of combustion of the fuel-air environment was not taken into account (1500 ° K gas was fed into the chamber), limit conditions of type "opening" ($T = 300 \text{ }^\circ \text{K}$, $P = 0 \text{ Pa}$ - excess pressure), the boundary condition of type "inlet" was set in the form of air flow taking into account its temperature. The boundary conditions were determined on all surfaces of the computational domain and included the conditions on the solid walls, at the inlet and outlet, the boundary conditions on the solid walls were determined from the condition of the flow adherence to the smooth adiabatic wall. The simulation results made it possible to achieve stable operation of the ejector by which the graphite is fed into the reaction chamber. The need to re-profile the chamber to provide a more stable vortex flow within the reaction chamber was detected to allow for the separation of expanded and unexpanded graphite, increasing the reaction time of the expansion, increasing the magnitude of thermal expansion of oxidized graphite, creation of a uniform thermal field in the reactor, which increased the sorption capacity of thermally expanded graphite.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS CFX ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА В РЕАКЦИОННОЙ КАМЕРЕ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СОРБЕНТА НА ОСНОВЕ ТЕРМОРАЗШИРЕННОГО ГРАФИТА

Ф.И.Кирчу, канд.техн.наук, доцент, А.Ф.Никулин, д-р техн.наук, Кодрик А.И, канд.техн.наук, Титенко А.Н., канд.техн.наук, Мороз А.И.

Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты, Украина

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

терморасширенный графит, реакционная камера, моделирование процесса, теплообмена, газовый поток, инжектор, поля скорости и температуры.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена описанию технологии оценки характеристик реакционной камеры для получения термически расщепленного графита как сорбента для нефтепродуктов с использованием методов численной газодинамики, основанных на использовании программного комплекса ANSYS - 12.

Целью данного исследования является оптимизация геометрических и тепловых параметров реакционной камеры мобильной установки, что обеспечивает максимальную степень теплового расширения окисленного графита.

В расчетах использовались следующие допущения и ограничения: моделирование проводилось с использованием модели сжатого идеального газа, использовалась стандартная модель турбулентной вязкости SST, теплообмена через стенки камеры с окружающей средой не было, моделирование проводилось без подачи порошка окисленного графита, вместо подачи воздуха (с начальной температурой 300 ° K) в количестве, эквивалентном графиту для расчета равной величины поглощения тепла, химическая реакция горения топливовоздушной среды не была учтена (при подаче газа 1500 ° K в камеру) предельные условия типа «открытие» ($T = 300 \text{ }^\circ \text{K}$,

$P = 0$ Па - избыточное давление), граничное условие типа «inlet» было установлено в Форма воздушного потока с учетом его температуры и температуры.

Граничные условия были определены на всех поверхностях расчетной области и включали условия на твердых стенках, на входе и выходе, граничные условия на твердых стенках определялись из условия прилипания потока к гладкой адиабатической стенке.

Результаты моделирования позволили добиться стабильной работы эжектора, благодаря которому графит подается в реакционную камеру.

Была выявлена необходимость перепрофилирование камеры для обеспечения более стабильного вихревого потока внутри реакционной камеры, чтобы можно было сепарировать расщепленный и нерасщепленный графит, увеличивая время реакции расширения, увеличивая величину теплового расширения, окисленного графит, создания однородного теплового поля в реакторе, что увеличило сорбционную емкость термически расщепленного графита.