

Па; відхилення пульсацій температури – від 20,5 до 57,9

Обробка даних експерименту в критеріальному вигляді засвідчила, що зростання критерію Рейнольдса газів за умов одночасної зміни частоти і відхилень пульсацій тиску та температури газів призводить до збільшення критерію Нусельта, який розраховано за середнім коефіцієнтом тепловіддачі (рис.4). Це свідчить про позитивний вплив характеристик турбулентності потоку газу, до яких відносимо частоту і значення згаданих відхилень, на конвективний теплообмін.

Отримані нами результати узгоджуються з даними щодо тепловіддачі пульсуючого потоку рідини в горизонтальній трубі, що засвідчує їх надійність [6].

Література

1. Герловин Л.И., Слущер С.М. Судовые утилизационные и комбинированные котлы. – Л.: Судпромгиз, 1962.–178 с.

УДК.621.532.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОБМІНУ ТРУБЧАСТОГО ТЕПЛОМАСООБМІННОГО ЕЛЕМЕНТУ

Я.М.Дем'янчук

ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, teplo@ifdtung.if.ua

Проведено дослідження процесу теплообміну трубчастого тепломасообмінного елемента на різних режимах роботи. В результаті обробки експериментальних даних отримано критеріальну залежність, яка може бути використана при проектуванні і розрахунку оптимальних параметрів роботи масообмінних апаратів газової і хімічної промисловості

При видобуванні та транспортуванні природного газу від родовищ до споживачів постає питання вилучення з газового потоку надмірної кількості газоподібної вологи, яка призводить до утворення гідратів у внутрішній порожнині трубопроводів, корозії устаткування, що, в свою чергу, збільшує витрати на транспортування, а в окремих випадках спричиняє аварії. Тому ефективна робота установок осушення газу відіграє важливу роль у надійному функціонуванні газотранспортної системи в цілому. У вітчизняній практиці широко застосовується абсорбційне осушення природного газу за допомогою гліколю високої концентрації. В

експлуатаційних витратах на осушення газу основну частину складають втрати гліколю з

2. Иванов В.Д., Смирнов Ю.А. Эксплуатация котельных установок дизельных судов. – М.: Транспорт, 1971. - 210с.

3. Долішній Б.В., Козак Ф.В., Середюк О.Є., Чеховський С.А. Дослідження якісних параметрів дизельних двигунів // Методи та прилади контролю якості. – 2000. - № 5. – С.79-83.

4. Долішній Б.В., Козак Ф.В. Про утилізацію теплоти відхідних газів двигуна внутрішнього згорання / Вісник Державного університету "Львівська політехніка". Спеціальний випуск: Проблеми економії енергії. – Львів, 1998. - с. 92.

5. М.А. Михеев, И. М. Михеева. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. 342 с.

6. И.М. Федоткин, А.С. Заяц. Обобщение опытных данных по теплоотдаче к пульсирующему потоку жидкости в горизонтальной трубе / Известия высших

учебных заведений. – 1968. – № 11. – С. 72-76.

Research has been done into the heat exchange process of tubular heat-mass exchange element under various operation regimes. The resulting experimental data showed criteria dependency, which can be used when projecting and calculating optimal operating parameters of mass-transfer apparatus of gas and chemical industries

потоком осушеного газу [1]. Отже, радикального зменшення експлуатаційних витрат можна досягнути при використанні таких технологій осушення газу, які забезпечують мінімальні втрати абсорбента.

Досягненню поставленої мети буде сприяти використання гліколів зниженої концентрації за умови низької температури контакту з газом. Крім того, знижена концентрація гліколю дозволить зменшити затрати на його регенерацію. Все це вимагає розробки та застосування принципово нового типу абсорбційного обладнання.

Нами запропонований спосіб низькотемпературного осушення природного газу який захищений патентом [2]. Даний спосіб передбачає використання такого контактної пристрою, в якому масообмін між природним газом і гліколем супроводжується відведенням теплоти від зазначених фаз. Цим умовам задовольняє трубчастий тепломасообмінний елемент, що складається з аксіального завихрювача у вигляді полоси з пелюстками для турбулізації газу та спіралі з дроту, яка охоплює завихрювач і розташована на внутрішній поверхні труби [3].

Такий тепломасообмінний елемент дозволяє поєднати тепломасообмін у внутрішній порожнині вертикально розташованої труби з теплообміном в між трубному просторі. Завдяки цьому можливе його застосування як на стадії абсорбційного осушення природного газу з одночасним теплообміном для підтримання потрібної температури абсорбції, так і на стадії регенерації гліколю для диференціального підведення теплоти по висоті регенератора. Останнє дозволяє зменшити на (25-55) % енергетичні витрати з регенерації [4].

З метою дослідження гідродинамічних, масообмінних та теплообмінних характеристик запропонованого елемента створено дослідний стенд, що дозволяє змінювати параметри контактуючих фаз в широкому діапазоні [5]. Стенд складається з верхнього та нижнього розподільвачів, в яких закріплено досліджуваний елемент, термостата і краплевідбійника. Для зменшення втрат тепла в навколишнє середовище трубчастий елемент, розподільвачі, з'єднувальні трубопроводи покриті шаром теплоізоляції.

Геометричні характеристики досліджуваного тепломасообмінного елемента наступні:

– завихрювач в вигляді полоси в якій з кроком 40 мм просічені вікна. Пелюстки отримані в результаті просічки відгинаються в протилежні сторони в межах одного вікна. Ширина полотна - 21 мм, товщина полотна - 1мм;

– дротяна спіраль з кроком 35 мм. зовнішній діаметр - 25 мм, діаметр дроту - 1,75 мм;

– внутрішній діаметр труби - 25 мм, довжина дослідної дільниці елемента насадки - 1250 мм.

На стенді передбачено контроль наступних параметрів: температури газу - ртутними термометрами з ціною поділки 0,1 та

0,2 °С; температури рідини на виході з термостата та на вході і виході з трубчастого елемента - термопарами типу ТХК-1489 згідно ГОСТ 6616-74 з вторинним приладом Р4833 (точність вимірювання температури 0,1 °С); витрати газу – газовим лічильником G6 з ціною поділки 0,0002 м³; витрати рідини – за допомогою ротаметра типу РМ-0,4 ГУЗ і, паралельно, ваговим методом. Перепад тиску на трубчастому елементі визначався за допомогою диференційного мікроманометра ММН-240 з ціною поділки 0,2 мм.вод.ст. В процесі досліджень фіксувався барометричний тиск за барометром МД-49 та вологість повітря – аспіраційним психрометром М-34.

Дослідження тепломасообмінного елемента проводилися в умовах „чистого” теплообміну на системі „атмосферне повітря – мінеральне масло” [6,7]. Вибір теплоносіїв був обумовлений необхідністю виключити вплив масообмінних процесів на теплообмін. Крім того, мінеральне масло при зміні температури в широкому діапазоні міняє свої теплофізичні властивості. Це дозволяє змодельовати процес теплообміну як в абсорбері так і в десорбері установки осушення природного газу.

Експерименти проводились в наступній послідовності: масло, попередньо нагріте до заданої температури в термостаті, подавалося через ротаметр в верхній розподільвач, а звідти – в трубчастий елемент. Конструкція розподільвача забезпечує організацію рівномірної подачі масла по периметру трубчастого елемента. В нижньому розподільвачі масло за допомогою спеціальної пастки збиралося в один потік і відводилося знову до термостату. Належна увага приділена заміру температури масла безпосередньо на вході та на виході з теплообмінного елемента, що вимагало вирішення певних проблем по розміщенню термопар в потоці масла. Повітря подавалося за допомогою газодувки через лічильник в нижній розподільвач, звідки воно надходило в трубчастий елемент. Після контактування з маслом, нагріте повітря через верхній розподільвач направлялося в краплевідбійник і далі в атмосферу. Температури повітря також фіксувалися безпосередньо на вході та виході з теплообмінного елемента за допомогою ртутних термометрів.

Досліди виконані в таких інтервалах зміни параметрів контактуючих фаз: швидкості повітря – (1,5 ÷ 4,5) м/с; густини зрошення – (105 ÷ 320) кг/(м²·год); температури мінерального масла на вході в елемент (40 ÷

120)°C; температура повітря на вході – (14 ÷ 22)°C.

Після виходу не заданий режим, з метою стабілізації характеристик, установка працювала до досягнення стабільності вихідних температур потоків після чого фіксувалися покази приладів. Значення витрат теплоносіїв, перепаду тиску на трубчастому елементі приймалися середніми за трьома-п'яти замірами.

В кожному досліді перевіряли виконання рівняння теплового балансу

$$Q_{мас} = Q_{нов} + Q_{втр} ,$$

де

– $Q_{мас}$ - теплота, що віддається мінеральним маслом, Вт;

– $Q_{нов}$ - теплота, отримана повітрям, Вт;

– $Q_{втр}$ - втрати теплоти від зовнішньої поверхні ізоляції до навколишнього середовища, Вт.

До обробки приймали дані дослідів в яких розбіжність прихідної і витратної частин рівняння теплового балансу не перевищувала максимально можливої похибки експерименту ± 6%.

При дослідженні гідродинаміки запропонованого трубчастого елементу доведено наявність трьох режимів роботи, які були виявлені раніше на бігвинтовій насадці [5]:

- вільного стікання рідини;
- підвісання;
- захлинання.

Для експлуатації найбільш придатним в якості робочого є режим вільного стікання рідини, який існує в широкому діапазоні зміни швидкості газової фази. Режим підвісання існує у вузькому діапазоні зміни швидкості газу. Слід зазначити, що для досліджуваного тепломасообмінного елементу характерна наявність збільшеного режиму вільного стікання рідини по відношенню до повного діапазону роботи елементу в порівнянні з бігвинтовою насадкою [5]. Тому при дослідженні теплообмінних характеристик основну увагу приділено вивченню існуючих залежностей в межах першого режиму.

Для теплообміну при безпосередньому контактуванні потоків теплоносіїв коефіцієнт теплопередачі рівний коефіцієнту тепловіддачі α :

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_p} + \frac{1}{\alpha_2}$$

де α_p і α_2 – коефіцієнти тепловіддачі зі сторони рідинної і газової фаз, відповідно.

Раніше проведені дослідження [7] теплообміну повітря і мінерального масла при їх безпосередньому контактуванні показали, що теплообмін визначається термічним опором газової фази. При нехтуванні останнім рівняння виглядатиме так:

$$\alpha \cong \alpha_2 .$$

Коефіцієнт тепловіддачі відносили до одиниці внутрішньої поверхні елементу, оскільки точне значення теплообмінної поверхні контактуючих фаз не відоме, а експериментальне визначення її – надзвичайно складна проблема:

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta t_{сер} \cdot F} ,$$

де: α – коефіцієнт тепловіддачі, $\frac{Вт}{(м^2 \cdot К)}$;

Q – кількість переданої теплоти від рідини до газу, визначена за рівнянням теплового балансу, $Вт$; $\Delta t_{сер}$ – середньологарифмічна рушійна сила процесу з врахуванням протиточного руху фаз вздовж елементу в цілому, °C.

Результати експериментів оброблялися в критеріальній формі. Для характеристики теплообміну в тепломасообмінному елементі застосовано залежність виду:

$$f(Nu, Re_2, Re_p, Pr_p) = 0 .$$

Критерії подібності, що характеризують теплообмін, визначалися за наступними рівняннями:

– критерій Нуссельта (Nu)

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_2} ,$$

– критерій Рейнольдса масла (Re_p)

$$Re_p = \frac{4 \cdot \Gamma_p}{\mu_p} ,$$

– критерій Рейнольдса повітря (Re_2)

$$Re_2 = \frac{u_o \cdot d \cdot \rho_2}{\mu_2} ,$$

– критерій Прандтля масла (Pr_p)

$$Pr_p = \frac{\mu_p \cdot C_p}{\lambda_p} .$$

В зазначених критеріях: d – внутрішній діаметр тепломасообмінного елементу, м; λ_2, λ_p – коефіцієнти

теплопровідності повітря і масла, $Bm/(M \cdot K)$; μ_z, μ_p – коефіцієнти динамічної в'язкості повітря і масла, $H \cdot c / M^2$; ρ_z – густина повітря, Kg / M^3 ; C_p – питома масова ізобарна теплоємність масла, $Dж / (Kg \cdot K)$; u_o – осьова швидкість газу в трубі, M / c ; Γ_p – лінійна густина зрошення, $Kg / (M \cdot c)$.

Графічна обробка результатів експериментів показала, що в режимі вільного стікання рідини критерій Нуссельта при збільшенні критерія Рейнольдса повітря зростає при $Re_p = idem$ і $Pr_p = idem$ (рис. 1). Це пояснюється позитивним впливом турбулізації газової фази на міжфазний теплообмін. При збільшенні критерія Рейнольда рідини критерій Нуссельта зменшується при $Re_z = idem$ і $Pr_p = idem$. Останнє пояснюється наявністю ламінарного режиму руху плівки мінерального масла вздовж дрютяної спіралі, так як витрати масла в досліді підтримувались відносно невеликими з метою максимального наближення відношення витрат контактуючих фаз до умов абсорбційного осушення природного газу. При збільшенні витрати масла, а значить і критерія Рейнольдса, зростає товщина плівки, що збільшує термічний опір теплопровідності плівки. В результаті зменшується коефіцієнт тепловіддачі зі сторони рідинної фази і зменшується критерій Нуссельта.

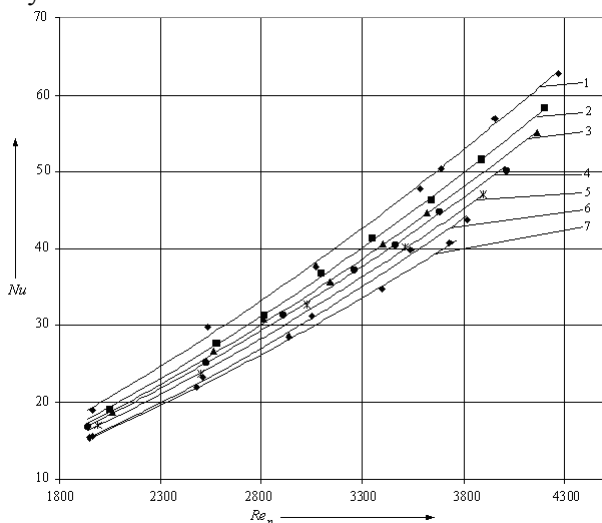


Рисунок 1 – Залежність критерію Nu від критерію Re_z при значенні критерію $Pr_p \cong 70 \pm 2$ та при значеннях критерію Re_p : 1

– $27 \pm 0,5$; 2 – $38,7 \pm 0,8$; 3 – $46,3 \pm 0,4$; 4 – $49,3 \pm 0,2$; 5 – $61,2 \pm 0,3$; 6 – $69,0 \pm 0,1$; 7 – $81,9 \pm 0,2$

На рис. 2 наведено залежність критерію Нуссельта від критерію Прандтля при $Re_p = idem$ і $Re_z = idem$. Зростання критерія Прандтля позитивно впливає на міжфазний теплообмін.

Обробка результатів дослідів показала, що залежність між визначуваним (Nu) та визначальними критеріями (Re_z, Re_p, Pr_p) адекватно описується рівнянням

$$Nu = a \cdot Re_z^{1,514} \cdot Re_p^{-0,192} \cdot Pr_p^{0,222}, \quad (1)$$

де коефіцієнт a залежить від кроку спіралі.

Отримане рівняння показує, що найбільше на критерій Нуссельта впливає критерій Рейнольдса повітря, істотно менше критерій Прандтля масла та критерій Рейнольдса масла. Рівняння (1) справедливе в діапазоні зміни параметрів: $Re_z = 1900 \div 4500$, $Re_p = 13 \div 160$, $Pr_p = 50 \div 115$.

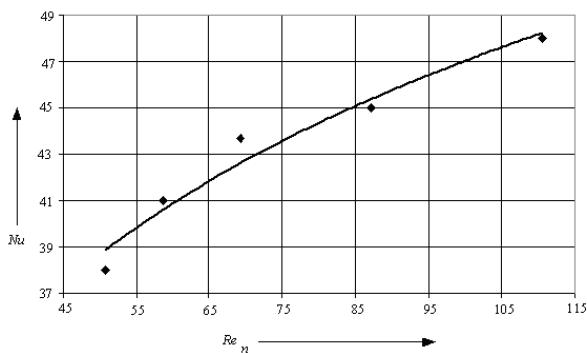


Рисунок 2 – Залежність критерію Nu від критерію Pr_p при значенні критерію $Re_z \cong 3500 \pm 20$ та при значенні критерію $Re_p \cong 41 \pm 3$

Співставлення рівняння (1) з рівнянням, яке отримав В.Г.Рябих на такій же системі „газ – рідина” в апараті із закрученими потоками [7] показує, що характер впливу критеріїв Re_z, Pr_p на критерій Nu в обох пристроях аналогічний, а характер впливу Re_p – протилежний. Це пояснюється тим, що плівка мінерального масла в апараті із закрученими потоками рухається турбулентно. Причому зазначена турбулентність забезпечується декількома тангенціально розташованими соплами, які розміщені по висоті труби з певним кроком. У випадку ж вільного стікання масла вздовж спіралі передача теплоти від поверхні плівки, що рухається ламінарно, до її ядра здійснюється за рахунок теплопровідності. Одержане критеріальне рівняння (1) свідчить

на користь якраз такого механізму теплообміну.

Література

1. Козак Ф.В. Методика вибору насадки для абсорберів осушення газу. / Нафтова і газова промисловість. - 1992. - №2. - с. 47.
2. Пат. 40831 А України, МКИ 7 В01D53/14, 53/18. Спосіб низькотемпературного осушення природного газу / Ф.В. Козак, Я.М. Дем'янчук – №2000073909. Заявл. 04.07.2000; Опубл. 15.08.2001, Бюл. №7.
3. Пат. 30278 А України, МКИ 6 F 28D 1/04. Трубчастий тепломасообмінний елемент / Ф.В. Козак, Я.М. Дем'янчук – №98020798. Заявл. 17.02.1998; Опубл. 15.11.2000, Бюл. №6-П.
4. И.Л.Лейтес, В.Е.Дымов, Ю.Г.Карпова. Влияние внешних и внутренних параметров на термодинамическую эффективность абсорбционных процессов разделения газов. / Теоретические основы химической технологии. – 1976. -№5. том. X. с. 678-690.
5. Я.М.Дем'янчук, Ф.В.Козак. Дослідження теплообмінних характеристик бігвинтової насадки. / Державний міжвідомчий науково-технічний збірник „Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 1998. – Випуск 35, том 5, – ст. 77-83.
6. В.М.Рамм. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1966. – 768 с.
7. Большаков А.Г., Рябых В.Г. Исследование процесса теплообмена между газом и жидкостью при струйном перемешивании. Тезисы докладов II Республиканской научно-технической конференции в области процессов и аппаратов пищевых и химических производств, Киев, 1968.