

СТУДЕНТСЬКА НАУКОВО-ДОСЛІДНА РОБОТА

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ
ВІДБЕНЗИНЮВАННЯ ГАЗІВ В УСТАНОВКАХ НТС ТА НТА**

ДЕВІЗ «Відбензинювання газу»

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ.	5
1.1 Сучасний стан і шляхи розвитку технологій підготовки природного газу до переробки	5
1.2 Низькотемпературні методи переробки вуглеводневх газів. Технологічні схеми та режимні параметри роботи установок НТК, НТР, НТА.	6
1.3 Основні напрямки удосконалення основного обладнання установок НТС та НТА.	9
1.4 Висновки до першого розділу.....	12
РОЗДІЛ 2. ФІЗИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОСУШЕННЯ ТА ВИДАЛЕННЯ ВАЖКИХ ФРАКЦІЙ З ПРИРОДНОГО ГАЗУ МЕТОДОМ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ГАЗОДИНАМІЧНОЇ СЕПАРАЦІЇ.....	13
2.1 Фізична модель формування краплинної рідини у потоці природного газу	13
2.2 Механіка газових потоків з високодисперсною краплинною рідиною.....	14
2.3 Комп'ютерне моделювання процесів низькотемпературної газодинамічної сепарації	14
2.4 Розрахунковий експеримент. Узагальнення та аналіз результатів моделювання процесів осушення та видалення важких фракцій з природного газу методом низькотемпературної газодинамічної сепарації.....	16
2.5 Висновки до другого розділу.	17
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТРУБЧАТИХ КОНТАКТНИХ СЕКЦІЙ ЗІ ШНЕКОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО АБСОРБЕРА УСТАНОВКИ НТА.	18
3.1 Фізична модель контактування потоків у трубчастих тепломасообмінних секціях зі шнековими елементами.....	18

3.2 Гідродинаміка та тепломасообмін при контактуванні рідини та газу в контактних секціях зі шнековими елементами. Розробка багатофункціонального абсорбера для установки НТА. 19

3.3 Висновки до третього розділу 22

РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБСТЕЖЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ГАЗОСЕПАРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ УСТАНОВКИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ СЕПАРАЦІЇ ГНІДИНЦІВСЬКОГО ГПЗ..... 23

4.1 Призначення та технологічні параметри установки. Витратні показники 23

4.2 Опис технологічної схеми установки та об'єкта дослідження 24

4.3 Режимні параметри роботи установки. Розробка надзвукового низькотемпературного газодинамічного сепаратора. 26

4.4 Висновки до четвертого розділу..... 28

ЛІТЕРАТУРА 29

ДОДАТКИ

ВСТУП

Нині розробляється велика кількість нафтових, нафтогазових родовищ. Разом з нафтою вилучається розчинений в ній газ, який спалюють на промислах, що призводить не лише до непоправних втрат вуглеводнів, але і завдає екологічного збитку довкіллю.

Специфічною особливістю попутного нафтового газу є також неможливість його транспортування на великі відстані без попередньої підготовки. Раціональним є використання нафтового газу шляхом подання його в магістральній газопровід. Для цього потрібне очищення і осушення газу до показників, що відповідають нормативам газопроводу, із застосуванням комплексу споруд і технологічних схем вилучення водяної пари і вуглеводневих компонентів, здатних в умовах трубопроводу конденсуватися.

Для цього застосовують процеси абсорбції, адсорбції, низькотемпературної конденсації, низькотемпературної ректифікації. Проведення таких процесів з допомогою існуючого обладнання вимагає значних капітальних і енергетичних витрат.

В рамках даної роботи розглядаються процеси низькотемпературної абсорбції (НТА) та сепарації (НТС), шляхи оптимізації та вдосконалення їх апаратурного оформлення. Так для реалізації НТС найбільш доцільною і ефективною є технологія осушення газу, заснована на ізоентальпійному розширенні і охолодженні закрученого потоку газу, організації декількох ступенів сепарації в одному апараті. Технічний результат – підвищення ефективності газодинамічної сепарації і зниження витрат енергії, компактність устаткування, відсутність частин, що рухаються.

Для установки НТА актуальною є проблема нормалізації теплового режиму та підвищення ефективності процесу шляхом зняття тепла по висоті абсорбційного апарату; розробка ефективного багатофункціонального абсорбера.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ.

1.1 Сучасний стан і шляхи розвитку технологій підготовки природного газу до переробки

Для промислової підготовки газу на газоконденсатних родовищах і для заводської підготовки нафтового газу застосовують в основному процеси низькотемпературної сепарації (НТС) або конденсації (НТК). Охолодження газу проводиться за рахунок використання його надлишкового тиску при спрацьовуванні тиску газу на дроселях або турбодетандерних машинах. Весь процес НТС зводиться до охолодження природного газу з подальшим розподілом газоконденсатної суміші в сепараторі на рідку і газову фази.[1]

Недоліками установки НТС є: необхідність реконструкції установки з заміною джерела холоду після вичерпання вільного перепаду тиску; необхідність застосування інгібітору гідратуутворення, що ускладнює і здорожує схему процесу; високі втрати цільових компонентів з товарним газом; відносно низькі ступені видобутку газового конденсату.

Перевагами є: низькі капітальні вкладення і експлуатаційні витрати при наявності вільного перепаду тиску; одночасно з сепарацією має місце осушення газу до показників, необхідних для транспортування газу магістральними газопроводами.

Установки НТС виправдовують себе на початкових стадіях експлуатації свердловин або на невеликих родовищах. На великих родовищах доцільною є заміна установок НТС на установки низькотемпературної конденсації, що здійснюється при більш низьких температурах (мінус 90–120 °С) з поділом вуглеводневих сумішей на вузькі фракції або індивідуальні вуглеводні. [2]

Основними технологічними процесами подальшої переробки газу є процеси відбензинювання з наступним поділом нестабільного бензину на газовий бензин і індивідуальні технічно чисті вуглеводні.

Відбензинюванням називають процес вилучення з газу нестабільного газового бензину, що включає в себе висококиплячі вуглеводні (C₃H₈ + інші), тобто виділення широкої фракції вуглеводнів (ШФУ). Потім нестабільний

бензин поділяють на стабільний газовий бензин і індивідуальні технічно чисті вуглеводні або їх суміші - збагачені фракції (пропан - бутанова, пропан - пентанових та ін.)

Залежно від обсягів переробки, тиску, вмісту в газі цільових компонентів і глибини їх вилучення застосовують такі способи відбензинювання: компресійні; сорбційні (абсорбційно-десорбційні і адсорбційно-десорбційні); низькотемпературної конденсації і сепарації (НТК і НТС); низькотемпературні з використанням процесів дроселювання, конденсації і ректифікації.

Абсорбційно-десорбційний спосіб вилучення газового бензина з природних і нафтових газів є найпоширенішим в газонафтопереробній промисловості.

Процес абсорбції - поглинання газового компонента рідкою фазою - заснований на різниці парціальних тисків парів компонента, що поглинається в паровій і рідкій фазі. Протіканню процесу абсорбції сприяють підвищення тиску і зниження температури в системі.

Продуктами абсорбційної-десорбційної установок є сухий газ (метан + етан), паливний газ (метан + етан + пропан) і деетанізований нестабільний газовий бензин (C_3H_8 + вищі) або нестабільний газовий бензин (фракція C_2H_6 + вищі) при вилученні етану в якості цільового компонента.

1.2 Низькотемпературні методи переробки вуглеводневих газів. Технологічні схеми та режимні параметри роботи установок НТК, НТР, НТА.

Установка низькотемпературної конденсації

У сучасних установках відбензинювання газу для отримання холоду застосовують детандерні цикли, що дозволяють рекуперувати частину енергії стисненого газу, а також знизити температуру в циклі на виході з детандера до мінус 80-120 °С. [8]

Принципова схема установки НТК з турбодетандером:

Основний потік охолоджується в теплообміннику 1 і випарнику 3, допоміжний потік охолоджується в теплообміннику 2 холодним конденсатом, відведеним з сепаратора 4 і подається в колону-деетанізатор 11.

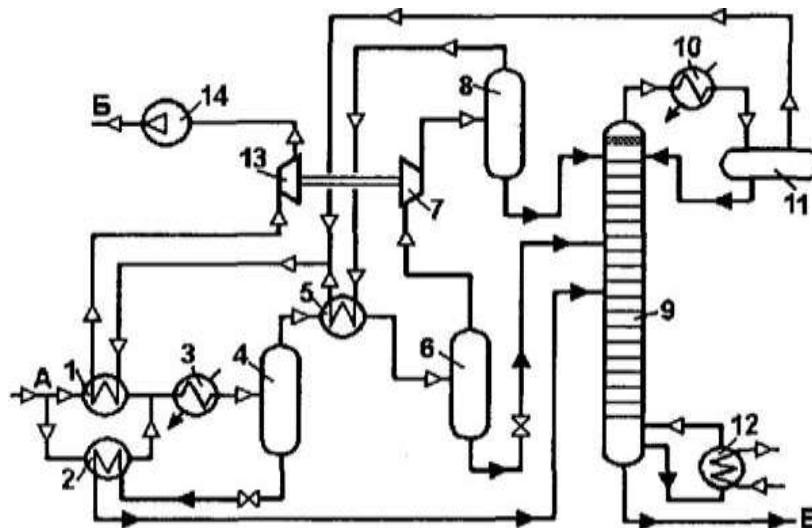


Рисунок 2.1 - Схема установки НТК з турбодетандером:

Потоки: А - сирий газ; В - відбензинений газ; В - нестабільний бензин;

1, 2, 5 - теплообмінники, 3, 10 - пропановий випарник; 4, 6, 8 - сепаратори; 7 - турбодетандером; 9 - колона - деетанізатор; 11 - збірник; 12 - випарник, 13, 14 - компресор

Гази, що відводяться з сепаратора 4 доохолоджуються в теплообміннику 5 і знову розділяються в сепараторі 6. Відведений з сепаратора 6 газ розширюється в детандері 7, частина вуглеводнів конденсується, конденсат подається на зрошення верхніх тарілок деетанізатора 11. З нижньої частини деетанізатора відводиться ШФУ. Обігрів колони ведеться за допомогою випарника 15. Холодні відбензинені гази (метан і етан) відводяться з сепараторів 10 і 12 на теплообмінники 1 і 7, потім дожимаються в компресорах і направляються споживачу.

Установки відбензинювання газів методами низькотемпературної ректифікації (НТР)

Процеси НТР проводять в області низьких температур (від мінус 50 до - 80 ° С), їх застосовують для відбензинювання жирних газів (з вмістом C_3H_8 + вищі понад 300 г/м³).[8]

Основний потік послідовно охолоджується в теплообмінниках 1 і 3 та в холодильнику 2 до мінус 50 ° С та поступає в сепаратор 4, з якого надходить на розширення в детандер 6. Охолоджена газорідинна суміш надходить у колону-деметанізатор 7, де під тиском 2,4 МПа відбувається відділення незріджених залишкових газів. З нижньої частини колони 7 відводиться рідка фаза, що

подається насосом 8 у колонну-деетанізатор 11. Низ колони 7 обігрівается парами, що утворилися в кип'ятильнику 9. Гази, що відокремилися в колоні 11 додатково охолоджуються у випарнику 12, а конденсат із збірника-сепаратора 13 насосом 14 подається як флегма на зрошення колони.

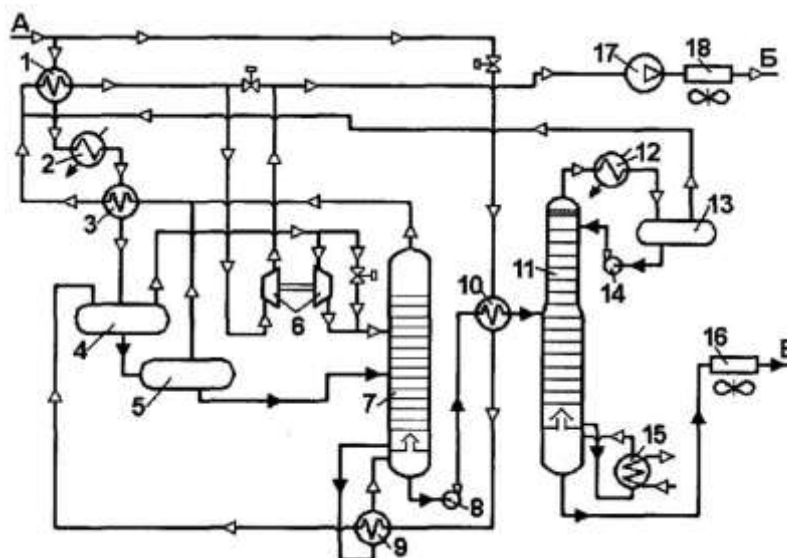


Рисунок 2.2 - Технологічна схема установки низькотемпературної ректифікації (НТР) з турбодетандером:

Потоки: А - сирій газ; В - відбензинений газ; В - нестабільний бензин (ШФЛУ);
1, 3, 10 - теплообмінники; 2, 12 - пропанові холодильники, 4 - сепаратор охолодженого газу; 5 - сепаратор; 6 - турбодетандером з компресором, 7 - колона - деметанізатор; 8, 14 - насоси; 9, 15 - кип'ятильники, 11 - колона - деетанізатор; 13 - збірка рефлюксу, 16, 18 - повітряний теплообмінник; 17 - компресор

Установка низькотемпературної абсорбції (НТА)

Осушений газ надходить на установку і послідовно охолоджується в теплообмінниках 1, 2, 3, потім газ доохолоджується пропаном в холодильнику 4 до температури мінус $(20-23)^\circ\text{C}$, і гази, що відокремилися в роздільнику 5 надходять в нижню частину абсорбера 8.[8]

Абсорбер зрошується охолодженим абсорбентом, що подається насосом 12 на верх колони. Відбензинений газ відводиться зверху абсорбера, охолоджується в пропановому холодильнику 4', надходить в сепаратор 6, а потім в теплообмінник 2.

Робота абсорбера проходить під тиском 3,5-3,8 МПа, температура верху колони до -15°C , температура низу колони -23°C . Насичений абсорбент

відводиться знизу колони 8 і подається в середню частину АОК 18. У нижній частині АОК з абсорбенту відокремлюються розчинені в ньому легкі гази метан і етан, а насичений розчин ДЕГа знизу колони відводиться в десорбер 22.

Принципова схему установки НТА :

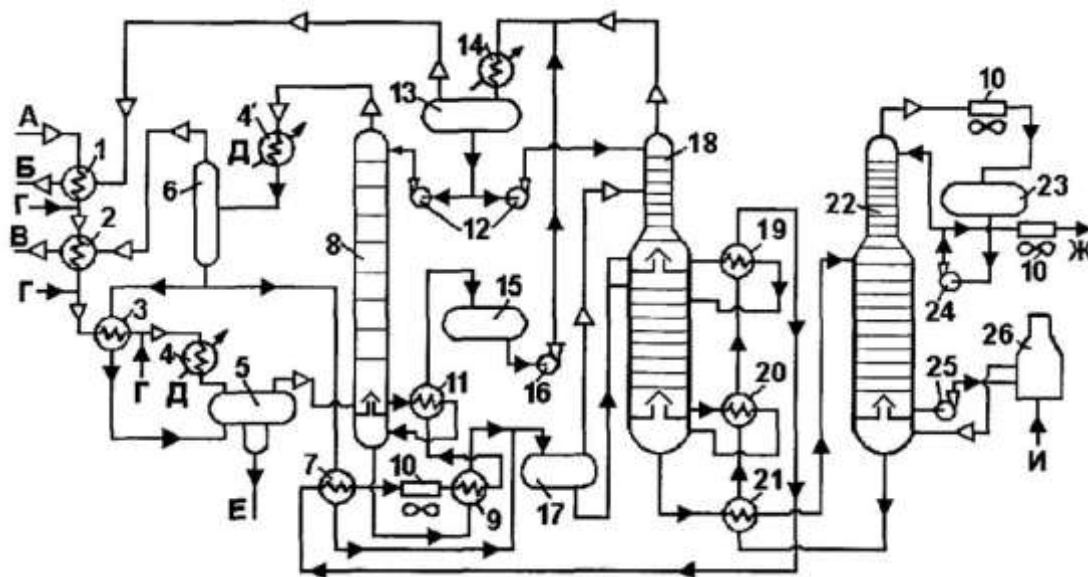


Рисунок 2.5 - Технологічна схема установки низько-температурної абсорбції (НТА) для відбензинювання газу:

Потоки: А - сирій газ; Б - скидної газ; В - відбензинений газ; Г - розчин ДЕГа; Д - хладагент - пропан; Е - насичений розчин ДЕГа на регенерацію; Ж - широка фракція легких вуглеводнів (ШФЛУ); І - газ паливний ;

1, 2, 3, 7, 9, 11, 19, 20, 21 - теплообмінники; 4, 4', 14 - пропанові холодильники, 5 - трифазний роздільник; 6 - сепаратор відбензиненого газу; 8 - абсорбер НТА; 10 - апарат повітряного охолодження; 12, 16, 24, 25 - насоси; 13, 15, 17, 23 - збірки; 18 - абсорбційної - отпарной колона; 22 - десорбер; 26 - піч трубчаста

Процес десорбції: пари широкої фракції вуглеводнів конденсуються в АВО поз. 10, частина конденсату зі збірника 23 насосів 24 подається на зрошення верху десорбера, а частина відводиться в якості готового продукту (ШФЛУ). Регенований чистий абсорбент, після проходження системи теплообмінників, надходить на зрошення колон 8 і 18.

1.3 Основні напрямки удосконалення основного обладнання установок НТС та НТА.

Розглянемо шляхи вдосконалення процесу НТС. У промислових умовах найбільш прийнятні технології низькотемпературної газодинамічної сепарації.

В якості генераторів холоду використовуються розширювачі газу, такі як дросельні клапани і вихрові труби. Слід зазначити, що для дросельного розширювача необхідний великий перепад тиску, який може бути забезпечений в основному при видобутку та підготовці природного газу. Тому найчастіше для інтенсифікації низькотемпературній технології НГ частіше застосовують більш ефективний вихровий розширювач - трубу Ранка– Хільша, перевагами якої є простота конструкції; одночасне отримання тепла та холоду і можливість одночасної низькотемпературної сепарації компонентів. Але вихрові трубки мають великий недолік - низький коефіцієнт корисної дії. Тому роботи в галузі із пошуку оптимальних параметрів особливо актуальні.

Особливості спільної роботи продуктивних газоконденсатних пластів і установок комплексної підготовки газу висуває низку вимог до технологічних схем і устаткування. Одним з таких вимог є гнучкість і адаптивність установок низькотемпературної сепарації до змін параметрів сировини.

Одним з варіантів рішення цієї проблеми є використання низькотемпературної газодинамічної сепарації, яка реалізується в газодинамічних сепараторах[19, 20]. Принцип дії таких апаратів зводиться до наступного. Вихідний потік багатоконпонентного вуглеводневого газу закручують. Після чого його розганяють в осьовому напрямку до швидкостей з числами Маха порядку 1,3-1,6. При цьому внутрішня енергія газу адіабатично переходить в кінетичну, статичні тиск і температура в потоці знижуються. Останній фактор сприяє конденсації вуглеводневих компонентів і парів води. Отримана рідка фаза в закрученому потоці концентрується на його периферії і осідає на стінках сепараційної камери. Звідки вона видаляється в зону зі зниженим тиском - ємність. Знижений тиск створюється ежектуванням з неї газової фази вихідним потоком, що розширюється. Очищений газовий потік загальмовують з відновленням тиску.

Сукупність всіх існуючих ознак забезпечує підвищення ефективності роботи; досить глибоке охолодження вихідного потоку газу; проведення конденсації компонентів в газі, що дозволяє збільшити кількість рідкої фази; відокремлення конденсату від газової фази при невеликій швидкості її

переміщення. Тобто для проведення процесу низькотемпературної газодинамічної сепарації актуальною є розробка високоефективних газосепараторів.

Ефективність роботи окремих апаратів і процесу НТА в цілому залежить від багатьох технологічних і конструктивних параметрів, виходячи з чого, визначилися основні напрями вдосконалення процесу НТА: зниження температури потоків, що надходять в абсорбер; підвищення тиску в системі низькотемпературної абсорбції газу; насичення регенованого абсорбенту етаном і (або) метаном за рахунок змішування абсорбенту з сухим газом абсорбера і (або) абсорбційно-відпарної колони; використання низькомолекулярних абсорбентів; організація процесу абсорбції і десорбції в умовах регульованого по висоті апарату теплос'єму і т. д.

Вузол абсорбції. Процес абсорбції вуглеводневих газів проходить з виділенням тепла - найбільший екзотермічний ефект спостерігається у верхній і нижній частинах абсорбера, так як наверху поглинається основна маса метану і етану, а внизу - бутана і більш важких вуглеводнів. Для нормалізації теплового режиму та підвищення ефективності процесу розроблені наступні рішення: з'єм тепла по висоті абсорбційного апарату (охолодження за схемою «абсорбер–холодильник-абсорбер»); охолодження насиченого абсорбента в теплообмінних пристроях, розміщених всередині апарату; насичення регенованого абсорбенту легкими вуглеводнями за межами абсорбера зі зніманням тепла абсорбції перед подачею абсорбенту в апарат і ін.

Спочатку на ГПЗ широке поширення одержали схеми НТА зі з'ємом тепла абсорбції за схемою «абсорбер–холодильник-абсорбер». Зараз стали відмовлятися від проміжного охолодження за цією схемою, тому що при такій організації процесу досягаються низькі коефіцієнти теплопередачі. Крім того, з'єм тепла при наявності такої схеми здійснюється локально, хоча інтенсивне виділення тепла здійснюється одночасно на кількох верхніх тарілках абсорбера. Тому на установках НТА стали використовувати вузли попереднього насичення регенованого абсорбенту легкими вуглеводнями - етаном і (або) метаном.

Цей варіант нормалізації теплового режиму процесу абсорбції відрізняється простотою і надійністю, що робить його вельми перспективним.

Вузол деетанізації. При незадовільну організацію режиму роботи абсорбційно-відпарної колони зміст цільових вуглеводнів (пропану та ін.) в сухому газі АОК збільшується, що призводить до зменшення виробництва ШФУ, оскільки більше цільових вуглеводнів потрапляє в паливний сухий газ.

В літературі [10] наведено рекомендації щодо вдосконалення технологічних схем вузла деетанізації при зміні температури і складу сировини АОК, глибини добування пропану і ступеня відпарювання етану, числа теоретичних тарілок і місця введення сировини в колону.

При вивченні впливу співвідношення числа тарілок в абсорбційній і відпарній секціях АОК встановлено, що сировину доцільно подавати приблизно в середину абсорбційно-відпарної колони. При цьому загальне число теоретичних тарілок не рекомендується збільшувати понад 20 (це відповідає приблизно 40 реальним тарілкам). А також ефективність роботи АОК можна істотно підвищити при подачі сировини у дві точки АОК з різною температурою.

1.4 Висновки до першого розділу.

Розглянуто сучасний стан розвитку технологій і техніки установок НТС для підготовки та установок НТА подальшої переробки природного газу.

Наведено загальну характеристику низькотемпературних методів переробки вуглеводневих газів, виходячи з чого зроблено висновок, що основним способом є схема НТА, яка може бути використана для вилучення етану та більш важких вуглеводневих газів різного складу.

Визначені основні напрямки оптимізації та вдосконалення апаратурного оформлення установок НТС та НТА.

РОЗДІЛ 2. ФІЗИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОСУШЕННЯ ТА ВИДАЛЕННЯ ВАЖКИХ ФРАКЦІЙ З ПРИРОДНОГО ГАЗУ МЕТОДОМ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ГАЗОДИНАМІЧНОЇ СЕПАРАЦІЇ

2.1 Фізична модель формування краплинної рідини у потоці природного газу

Потік, що надходить в сепаратор являє собою двофазну газорідинну суміш. Рідка фаза знаходиться у вигляді зважених в потоці крапель різного діаметра і у вигляді тонкої плівки на стінці труби. Рух потоку в трубі носить турбулентний характер, що призводить до інтенсивної коагуляції дрібних і дроблення великих крапель, що утворилися

За наявності пристроїв (напр. сопло Лавалю), які змінюють температуру і тиск газу, в потоці можливе зародження (нуклеація) дрібних крапель. В основі механізму утворення рідкої фази (туману) за соплом, лежить процес адіабатного розширення газової суміші, за якого одночасно збільшується об'єм суміші, знижується тиск пари і температура, так як робота розширення здійснюється за рахунок внутрішньої енергії газу. Тиск насиченої пари знижується зі зменшенням температури і призводить до збільшення пересичення пари. Під ступенем пересичення s розуміють відношення тиску пари в газі p_v до тиску насиченої пари над плоскою поверхнею тієї ж рідини.

$$s = \frac{p_v}{p_{v\infty}}; p_{v\infty} = \exp\left(C - \frac{E}{T}\right) \quad (2.1)$$

де T – абсолютна температура; C – константа; $E = 0,12 \cdot M_L \cdot l$, M_L – молекулярна маса пари, що конденсується; l – питома теплота пароутворення.

Над опуклою поверхнею, яку мають краплі, тиск насиченої пари вище, ніж над плоскою, за рахунок капілярного тиску і збільшується із зменшенням радіусу краплі, тому необхідною умовою конденсації пари в об'ємі газу є наявність пересичення пари, яке дозволяє компенсувати підвищений тиск. [14]

При адіабатному розширенні газу знижуються тиск і температура. В процесі конденсації температура суміші декілька збільшується, з часом значення парціального тиску пари далеко від краплі і на її поверхні вирівнюються за рахунок зменшення концентрації пари. Так як потік пари до

поверхні краплі зменшується, то зменшується і пересичення. Інший граничний випадок - швидкість дифузії мала, пересичення стає більше критичного. [14]

2.2 Механіка газових потоків з високодисперсною краплинною рідиною

Аерозолями або аеродисперсними системами називаються дисперсні системи з газовим середовищем і з твердою або рідкою дисперсною фазою. Найдрібніші частинки аерозолю суворо дотримуються ліній потоку середовища; на цьому засновано застосування аерозолів в експериментальній газодинаміці. Для дослідження течії газу в нього впускають тонкі димові струмені, що рухаються по лініях потоку. Товщина струменів визначає при цьому швидкість течії в даній точці, так як добуток швидкості на поперечний переріз струминки залишається постійним. Таким чином повністю визначається розподіл швидкостей газу.

Однак більші частки більшою чи меншою мірою виходять з лінії потоку, зміщуються по відношенню до них завдяки своїй інерції. Це зміщення призводить до "інерційного осадження" частинок на стінках при зміні напрямку течії. При осадженні аерозолів на різних перешкодах, в місцях різкої зміни напрямку потоку і т.д., необхідно враховувати не тільки нормальну але і тангенціальну складову сили інерції, тобто обчислювати траєкторію частинки з диференціальних рівнянь її руху.

Найважливішим завданням механіки аерозолів є знаходження умов осадження частинок на стінках.

2.3 Комп'ютерне моделювання процесів низькотемпературної газодинамічної сепарації

Трьохвимірною моделлю досліджуваних завихрювача та сопла Лавалю створена за допомогою САПР КОМПАС-3D, після чого за допомогою програмного продукту CAD- системи SolidWorks проведено моделювання руху потоку природного газу в створеній моделі внутрішнього сепараційного пристрою. Змодельовані трьохвимірні течії візуалізовано у вигляді заливок за значеннями швидкостей, за значенням тиску, траєкторій руху рис. (2.1-2.4).

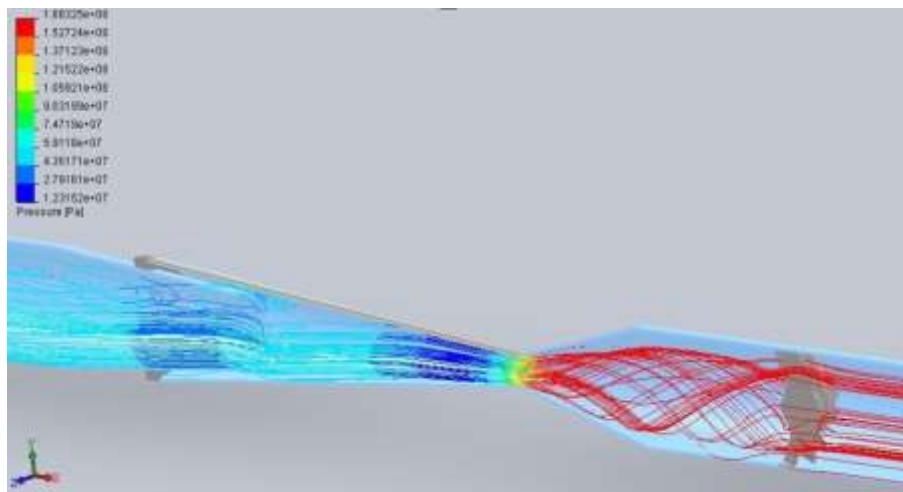


Рис.2.1 – Заливка за значенням поля тиску p , Па та татраекторія руху газового потоку

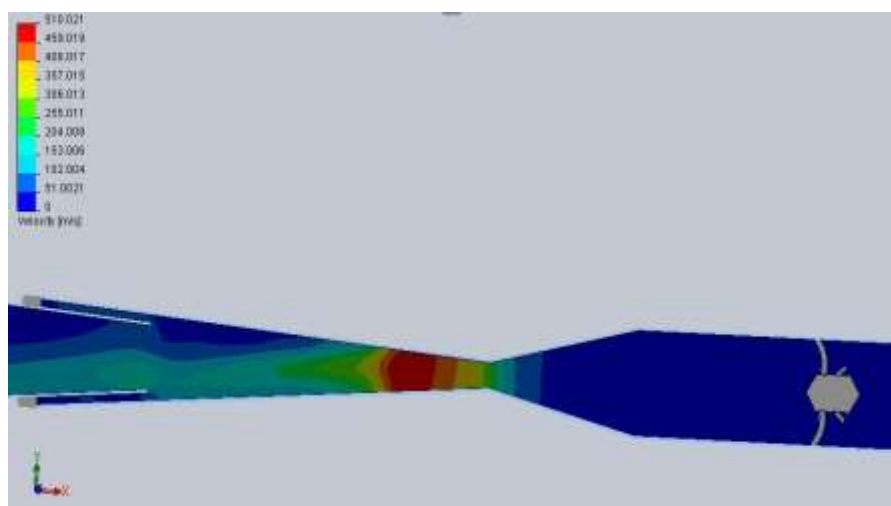


Рис. 2.2 – Заливка за значенням швидкості

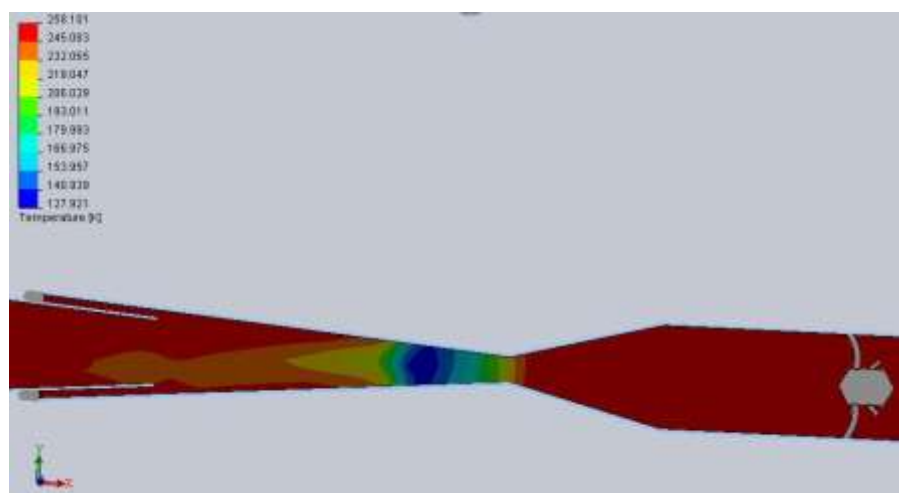


Рис.2.3 – Заливка за значенням температури.

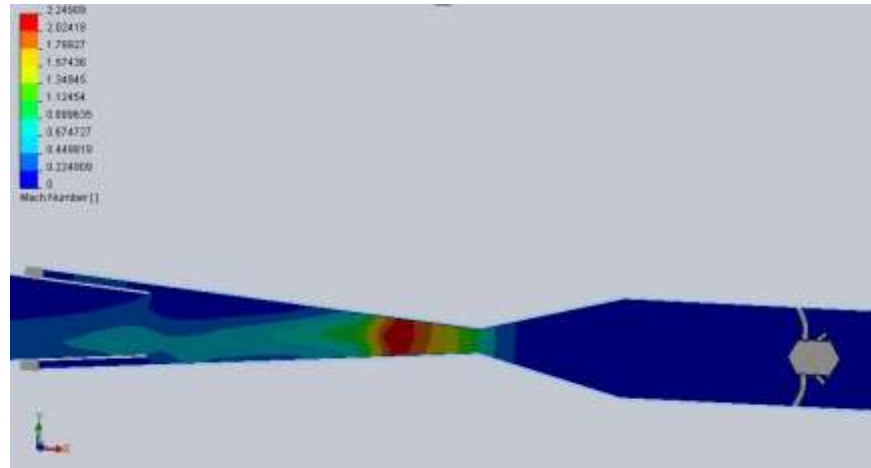


Рис. 2.4 – Заливка за значенням числа Маха

2.4 Розрахунковий експеримент. Узагальнення та аналіз результатів моделювання процесів осушення та видалення важких фракцій з природного газу методом низькотемпературної газодинамічної сепарації

Вихідними даними є параметри потоку газу у вхідному перерізі сопла: швидкість потоку газу $c_1 = 12$ м/с, температура $T_1 = 258$ К, тиск $P_1 = 4,5$ МПа. Геометричні параметри сопла: діаметр вхідного перерізу сопла $d_1 = 150$ мм, кут конусності дозвукової частини сопла $\alpha = 30^\circ$, кут розширення надзвукової частини сопла $\beta = 10^\circ$.

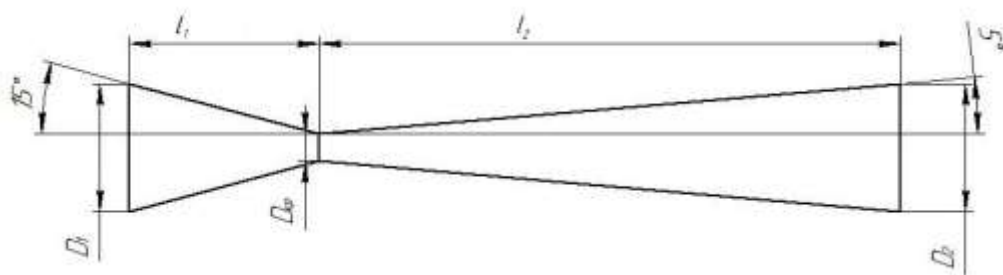


Рис. 2.5– Розрахункова схема сопла Лаваля

В ході проведення газодинамічних розрахунків за алгоритмом поданим в літературі [16], визначаються параметри потоку газу у вхідному, критичному та вихідному перерізах сопла: температура загальмованого потоку T^* ; швидкість звуку в соплі $\alpha_{кр}$; безрозмірна швидкість на вході в сопло λ ; швидкість звуку на вході α_1 ; число Маха на вході M ; безрозмірна температура на вході в сопло τ ; безрозмірний тиск на вході π_1 ; тиск гальмівного потоку P^* ; безрозмірна

щільність ε_1 ; щільність ρ_1 ; витрата газу через сопло Лавалю q ; щільність загальмованого потоку ε_1 . [16]

Аналогічно вище зазначені параметри визначаються для критичного та вихідного перерізів.

Результати розрахунку наведені в додатку А. Графічні залежності термодинамічних параметрів від довжини сопла наведено у додатку Б.

Результати комп'ютерного моделювання і технологічні розрахунки показують, що при проходженні через сопло Лавалю внаслідок адіабатного розширення відбувається перепад тиску і температури від 258 К до 170 К, що дозволяє знизити температуру точки роси, збільшити кількість конденсату, і як наслідок отримати осушений газ з мінімальним значенням вологовмісту. Рух потоку носить турбулентний характер, що сприяє інтенсивній коагуляції дрібних крапель. Наведена конструкція сепаратора з використанням в якості внутрішнього елемента завихрювача і сопла Лавалю дає змогу досягти значного перепаду температур та здійснити перехід від процесу низькотемпературної сепарації до низькотемпературної конденсації, відмовившись при цьому від парку теплообмінного обладнання, який призначений для попереднього охолодження.

2.5 Висновки до другого розділу.

Наведена фізична модель формування краплинної рідини у потоці природного газу.

Комп'ютерним моделюванням течій газового потоку з вмістом високодисперсної краплинної рідини у ньому, отримано характер розподілу швидкості руху, характер зміни тиску, температури по довжині внутрішнього сепараційного елемента, проведено аналіз отриманих даних.

Візуалізація результатів моделювання дозволяє з'ясувати значення гідродинамічних параметрів потоку, їх зміну по довжині сепараційного елемента.

РОЗДІЛ ЗДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТРУБЧАТИХ КОНТАКТНИХ СЕКЦІЙ ЗІ ШНЕКОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО АБСОРБЕРА УСТАНОВКИ НТА.

3.1 Фізична модель контактування потоків у трубчастих тепломасообмінних секціях зі шнековими елементами.

Контактна секція (рис. 3.1) [21] містить циліндричну обичайку 1, дві трубні решітки 2, вертикальні трубки 3, закріплені в решітках, штуцери для входу та виходу охолоджувальної рідини 4. В кожній трубці закріплений шнековий елемент 6, довжина якого дорівнює довжині трубки. Рідина плівкою стікає по поверхні шнека 6 всередині трубки 3. Назустріч рідині протитечією по трубці піднімається газ. Крізь поверхню плівки рідини відбувається масообмін між рідкою та газовою фазою. В міжтрубний простір 5, утворений циліндричною обичайкою та зовнішньою поверхнею трубок, через штуцери 4 вводиться та відводиться охолоджувальна рідина.

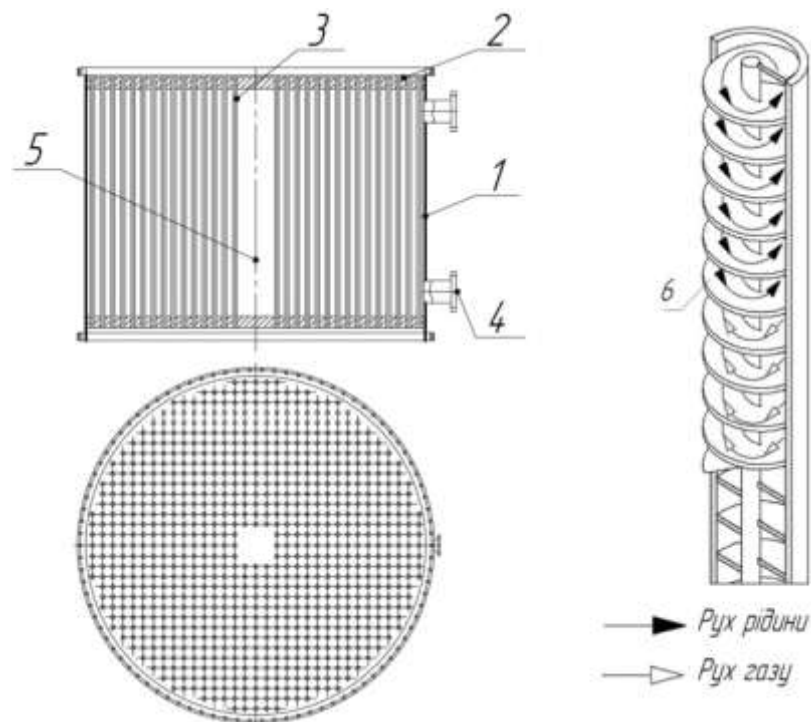


Рис. 3.1 – Контактна секція та трубка зі шнековим елементом.

1 – циліндрична обичайка, 2 – трубна решітка, 3 – трубка, 4 – штуцер для входу-виходу охолоджувальної рідини, 5 – міжтрубний простір, 6 – шнековий елемент.

Недоліками відомих в промисловості пристроїв є складність створення і збереження плівкового режиму стікання рідини всередині трубок по всій їх

довжині, а також недостатня інтенсивність тепловіддачі з внутрішньої поверхні труб, що є лімітуючою стадією процесу теплопередачі.

Одним з можливих шляхів вирішення даної проблеми є встановлення всередині кожної трубки шнекового елемента [21], при тому довжина цього елемента дорівнює довжині трубки. Таке виконання контактної секції дозволяє: підвищити ефективність її роботи за рахунок організації направлено рівномірного стікання плівки рідини під час масообміну; збільшити поверхню масообміну і теплообміну за рахунок розміщення шнекових елементів всередині трубок; зменшити висоту секції при збереженні величини площі поверхні масообміну.

3.2 Гідродинаміка та тепломасообмін при контактуванні рідини та газу в контактних секціях зі шнековими елементами. Розробка багатофункціонального абсорбера для установки НТА.

Гідродинаміка. Для визначення середньої товщини плівки застосовується рівняння Нав'є-Стокса в умовах усталеного одномірного потоку. Цей підхід являється класичним.

Для цього випадку рівняння Нав'є-Стокса можна записати у вигляді:

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} = \frac{\partial \omega_x}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial \omega_y}{\partial y} \quad (3.1)$$

А рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} = 0 \quad (3.2)$$

Після проведення всіх необхідних перетворень [12] отримали формулу для визначення товщини плівки:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3\Gamma\mu}{\rho^2 g \cos \beta}} \quad (3.3)$$

де β – кут нахилу поверхні по якій стікає плівка.

При русі плівки спостерігаються такі режими руху [12]: ламінарний рух рідини без хвилеутворення ($Re_{пл.} = 4-25$); ламінарний рух рідини з хвилеутворення ($Re_{пл.} = 25-2000$); турбулентний рух ($Re_{пл.} \geq 2000$).

При утворенні хвиль на поверхні плівки в заглибленнях між ними швидкість деяких шарів стає від'ємною. Це говорить про наявність в цих місцях вихрів, які забезпечують перемішування потоку.

При русі двофазних потоків – рідини в тонкій плівці та газу уздовж її поверхні - на межі між рідиною і газом виникають сили тертя, що уповільнюють (при протитоці) чи прискорюють (при прямотоці) рух плівки і відповідно до цього змінюють її товщину. При протитоці, якщо швидкість газу не перевищує 80-90% від швидкості захлинання, то вона практично не впливає на товщину плівки.

Досліджуючи коефіцієнт опору апарату для двофазного руху в протитоці [13] відповідно для $Re_r < Re_{гкр}$ та $Re_r > Re_{гкр}$ знайдено:

$$\xi_{оп} = \frac{86}{Re_r} \quad (3.5)$$

$$\xi_{оп} = \frac{0,11 + 0,9K^{2/3}}{Re_r^{0,16}} \quad (3.6)$$

де $Re_{гкр}$ – критичне значення.

Тепломасообмін в контактних секціях зі шнековими елементами.

Факт перемішування рідини при утворенні хвиль також широко застосовують при вивченні механізмів масообміну в хвилевому режимі руху плівки. Коефіцієнт масовіддачі в рідкій фазі є лімітуючою стадією процесу масопередачі і визначається за наступною формулою:

$$\beta_{ж} = \frac{D_{ж}}{\vartheta_{прив}} Nu'_{ж} \quad (3.8)$$

де $D_{ж}$ - коефіцієнта дифузії,

$\vartheta_{прив}$ - приведена товщина плівки.

Експериментальна перевірка теоретичних залежностей проводилася багатьма вченими [13]. Досліди показали, що при утворенні хвиль значення коефіцієнтів масовіддачі більші ніж при їх відсутності, при чому відхилення зростають зі збільшенням $Re_{пл.}$, досягаючи максимуму при $Re_{пл.} \approx 150$. При подальшому зростанні $Re_{пл.}$ відхилення зменшуються. Зростання коефіцієнту масовіддачі пояснюється перемішуванням рідини.

Отже, точки зору ефективності масовіддачі оптимальним є режим ламінарної течії плівки з утворенням хвиль. При створенні такого режиму в гладких трубках, під впливом коливань потоку може спостерігатися порушення цілісності плівки рідини. При використанні шнекових елементів плівка тече по плоскій похилій під невеликим кутом поверхні, що дозволяє організувати стабільний плівковий режим течії рідини, тому застосування шнекових елементів є доцільним.

Розглянемо теплопередачу в контактній секції. Основне рівняння теплопередачі має наступний вигляд:

$$Q = k \cdot \Delta t_{cp} \cdot F \cdot \tau \quad (3.9)$$

При проведенні процесу теплопередачі з застосуванням гладких труб, поверхня теплообміну дорівнює їх сумарній поверхні. Якщо використовувати запропоновані шнекові елементи, то поверхня теплообміну дорівнюватиме сумі поверхонь труб і шнеків, що істотно вище, ніж у першому варіанті.

Крім цього, шнековий елемент можна розглядати як внутрішнє спіральне оребрення труб. Коефіцієнт оребрення, що дорівнює відношенню поверхні оребреної труби до поверхні гладкої труби:

$$\phi = \frac{F_o}{F}, \quad (3.10)$$

в залежності від кроку шнека приблизно дорівнює $\sim 6-9$.

Виходячи з цього, можна сказати, що при встановленні всередині труб шнекових елементів, поліпшуються умови відводу тепла з трубного простору. За рахунок збільшення коефіцієнта теплопередачі можна зменшити розміри апарата при фіксованому тепловому навантаженні.

Об'єктом розробки є багатофункціональний абсорбер, який складається з вертикального пучка труб 1, закріплених в трубчастих решітках 2. Для подачі зрошувальної рідини служать розподільники 3. Поглинач, через штуцер А, надходить на розподільник 3, після чого потрапляє до труб і стікає по поверхні шнеків у вигляді тонкої плівки. Газ поступає через штуцер Б, рухається по трубах знизу вгору назустріч плівці. У міжтрубному просторі абсорбера рухається охолоджуюча рідина. Ця рідина надходить через штуцер Д.

Відбензинений газ відбирається з абсорбера через штуцер В, а відпрацьований абсорбент відводяться з апарату через штуцер В.

Перевагами абсорберів трубчастого типу є ефективність відведення тепла, що виділяється, малий гідравлічний опір, можливість роботи з запиленими газами, що не можна віднести до інших типів абсорберів.

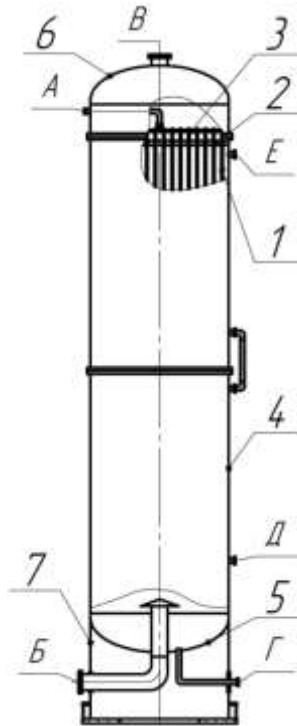


Рис. 3.2 - Плівковий абсорбер трубчастого типу

1-вертикальний пучок труб, 2-трубна решітка, 3-розподільний пристрій, 4-корпус, 5-
днище, 6-кришка, 7-опора

А - вхід абсорбенту, Б - вхід газу, В - вихід газу, Г - вихід готового продукту, Д - вхід охолоджувальної рідини, Е - вихід охолоджуючої рідини.

3.3 Висновки до третього розділу

В даному розділі були надана фізична модель контактування потоків у трубчатих тепломасообмінних секціях зі шнековими елементами.

Розглянута гідродинаміка руху тонкої плівки та процеси тепломасообміну при контактуванні фаз. При розгляді залежностей, що характеризують ці процеси, зробили висновок, що оптимальним є хвилевий режим руху плівки, виходячи з чого зробили висновок про доцільність використання шнекових елементів.

Наданий опис конструкції та принципу дії об'єкта розробки – багатофункціонального абсорбера установки НТА.

РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБСТЕЖЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ГАЗОСЕПАРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ УСТАНОВКИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ СЕПАРАЦІЇ ГНІДИНЦІВСЬКОГО ГПЗ

4.1 Призначення та технологічні параметри установки. Витратні показники

УНТС призначена для більш повного виділення вуглеводнів C_{3+} і вище шляхом охолодження газу до низьких температур. Сировиною для УНТС являється зкомпримований і осушений газ з тиском до 55 кг/см² і температурою до 35°C. Для охолодження газу до температури - 15°C на УНТС застосовується холодоагент–пропан технічний ПТ, ДСТУ 4047-2001.

Норми витрат основних видів сировини, матеріалів і енергоресурсів наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Норми витрат основних видів сировини, матеріалів і енергоресурсів.

Найменування сировини, матеріалів, енергоресурсів	Найменування показника та одиниця	Норми витрат	
		За проектом	Заводські
1	2	3	4
1. Пропан технічний на холодильну установку	Кг/тис.м ³	-	1,7
2. Діетиленгліколь	Кг/тис.м ³	-	0,10
3. Масло МГД-14М	Кг/моточас	4,8	4,8
4. Масло МС-20	Кг/моточас	3,6	3,6
5. Електроенергія на переробку газу Електроенергія на виробництво теплоенергії	кВт г./тис.м ³ газу	-	28,5
	кВт г./Гкал	-	22,1
6. Теплоенергія	Мкал/тис.м ³ газу	-	90
7. Паливо на переробку газу Паливо на вироблення Теплоенергії	Н м ³ /тис.м ³ газу	-	44,8
	Н м ³ /Гкал	-	115,8
8. Одорант (етилмеркаптан) для одоризації газу	Кг/тис.м ³	-	0,0195

4.2 Опис технологічної схеми установки та об'єкта дослідження

Технологічна схема установки низькотемпературного охолодження і сепарації газу (УНТС) Гнідинцівського ГПЗ наведена на рис. 4.1.

Газ після установки осушки газу (УОГ) поступає в міжтрубний простір теплообмінників поз.Т-701/1-5,Т-702/1-2, де охолоджується до температури 10-40°C відбензиненим газом, що поступає з температурою -15 °С в трубний простір теплообмінників поз.Т-701/1-5 з сепараторів поз.С-701/1-2. В теплообмінниках поз.Т-702/1-2 осушений газ охолоджується до температури 10-30°C потоком ШФЛВ із С-701/1-2.

Попередньо охолоджений газ з температурою до 10-30°C з теплообмінників поступає в трубний пучок випаровувачів - холодильників поз. И-701/1-3, де охолоджується до температури (-15°C) за рахунок теплообміну з пропаном, що випаровується. В корпус пропанових випаровувачів подається рідкий пропан. Пари пропану поступають в відділювачі рідини поз.ОЖ-701/1-3 і далі в систему всмоктування пропанових компресорів через поз.ПК-501/1-3, поз.Е-504.3 випаровувачів поз.И-701/1-3 газоконденсатна суміш з температурою -15°C поступає в сепаратори поз.С-701/1-2, де проходить відокремлення газу від конденсату. З сепараторів поз.С-701/1-2 відбензинений газ з температурою до -15°C поступає в трубний простір теплообмінників поз.Т-701/1-5,де нагрівається до температури 2-10°C за рахунок теплообміну з газом, що поступає з установки осушки газу, а потім поступає в поз.Т-703/1-2, де нагрівається газом до 40°C після чого виводиться в пункт збору та видачі готової продукції. Вуглеводневий конденсат з сепараторів поз.С-701/1-2 з температурою до -15°C поступає в трубний простір теплообмінників поз.Т-702/1-2, де нагрівається за рахунок теплообміну з газом, що поступає з установки осушки газу.

Газоконденсатна суміш з температурою до +30°C і тиском до 25 кгс/см² з теплообмінників поз.Т-702/1-2 поступає в ємність вивітрювання конденсату І ст. поз.Е-701.

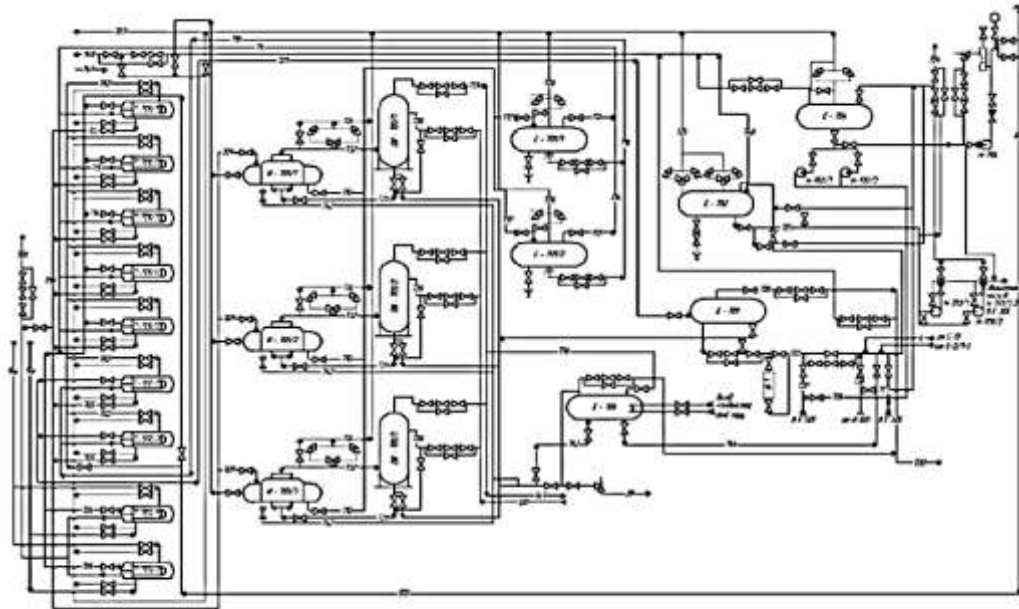


Рисунок 4.1 - Принципова технологічна схема установки низькотемпературної сепарації та охолодження природного газу Гідинцівського ГПЗ

В ємності поз.Е-701 проходить вивітрювання газу, що розчиняється в конденсаті. Конденсат з ємності поз. Е-701 за рахунок перепаду тиску скидається в ємність вивітрювання конденсату II ст. поз.Е-702 або подається на блок деетанізації газового конденсату. Тиск в ємності поз.Е-702 підтримується до 12 кгс/см^2 . За рахунок зниження тиску в ємності поз.Е-702 проходить більш повна дегазація вуглеводневого конденсату. Технологічною схемою передбачена подача газу вивітрювання з ємності поз. Е-701 в ємність поз.Е-702 для витискування вуглеводневого конденсату в парк готової продукції, минаючи насоси поз. Н-701/1-2, а також подача вуглеводневого конденсату безпосередньо з ємності поз.Е-701 минаючи ємність поз.Е-702 на прийом насосів поз.Н-701/1-2, а потім в резервуарний парк готової продукції. Заповнення ШФЛВ ємності поз.Е-704, в залежності від вимог використання, може проводитись із лінії прийому насосів поз.Н-701/1-2, або із лінії скидання конденсату із поз.Е-701 в поз.Е-702. Для більш глибокого вилучення із газу компонентів C_3 +вище передбачено впорскування деетанізованого конденсату насосом поз.Н-704 із ємності поз.Е-704 в потік газу після УОГ перед теплообмінниками поз.Т-701/1-5 і поз.Т-702/1-2. Для дренажу випаровувача поз.И-701/1-3, відділювача рідини поз.ОЖ-701/1-3, ємності поз.Е-701 призначена ємність поз.Е-703.

Принципова технологічна схема установки низькотемпературної сепарації та охолодження природного газу приведена на рис.4.1 відображає функціональний взаємозв'язок між основним технологічним обладнанням та розміщення трубопровідної арматури.

Об'єктом дослідження є сепаратор газу поз. С-701/2 – нафтогазовий, призначений для відділення вуглеводневого конденсату від газу. Ескіз апарату наведено на рис. 4.2:

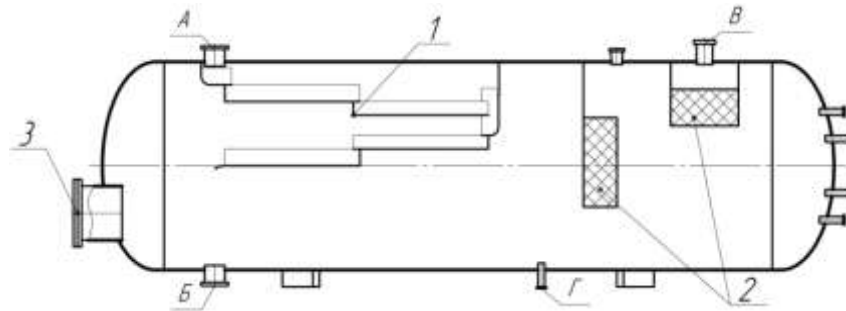


Рис. 4.2 – Сепаратор газу

1 - полиці, 2 – сітчасті відбійники, 3 – люк; А – вхід вуглеводневої газової суміші, Б – вихід конденсату, В – вихід газу, Г – дренаж.

Сепаратор являє собою суцільнозварний горизонтальний зварний апарат. Газова суміш проходить полиці, при цьому відділення краплинної вологи відбувається під дією сили тяжіння, далі через сітчасті відбійники – фільтруванням. Наведена конструкція має ряд недоліків: не ефективне використання простору апарата, низька ефективність осушення газу, великі енергозатрати на проведення процесу. Доцільним є вдосконалення конструкції з метою проведення процесу сепарації ефективніше.

4.3 Режимні параметри роботи установки. Розробка надзвукового низькотемпературного газодинамічного сепаратора.

Як зазначалося раніше є доцільним вдосконалення конструкції газосепаратора установки НТС Гнідинцівського ГПЗ. Розробка низькотемпературного газодинамічного сепаратора проводилась шляхом зміни внутрішньої конструкції. Модель газодинамічного сепаратора наведена на рис.4.3. Сепаратор являє собою суцільнозварний горизонтальний сталевий апарат.

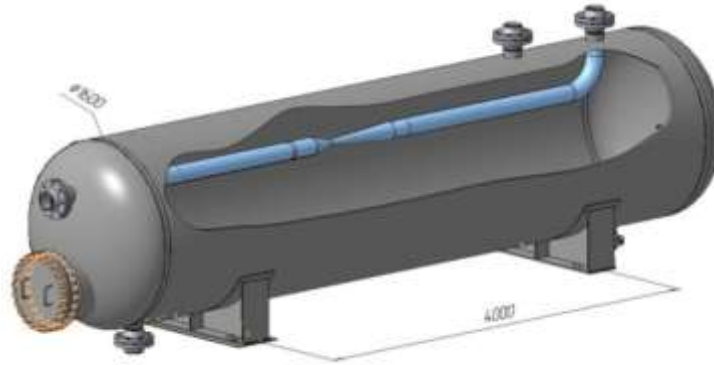


Рис. 4.3 – 3D модель газодинамічного сепаратора

До його складу входить корпус, патрубок для входу багатоконпонентного вуглеводневого газу, завихрювач газу, сопло Лавалю, кільцевий зазор для відділення сконденсованих компонентів від розширеного та охолодженого закрученого потоку газу, патрубок для виведення сухого газу з сепаратора; патрубки для виведення конденсату з апарата. Охолоджений багатоконпонентний вуглеводневий газ через вхідний патрубок подається в сепаратор. Потік проходить через завихрювач, відбувається його закручування. Далі газова фаза поступає в сопло Лавалю, де відбувається її розширення. При розширенні газу в соплі при його перебігу з навіколзвуквою швидкістю потенціальна енергія – тиск газу – перетворюється в кінетичну енергію, при цьому газ охолоджується. За низької температури відбувається конденсація вуглеводневих компонентів C_{3+} і вище. Чим більше охолодження газу, тим глибше його осушення від рідини (зменшення температури точки роси компонентів, які конденсуються).

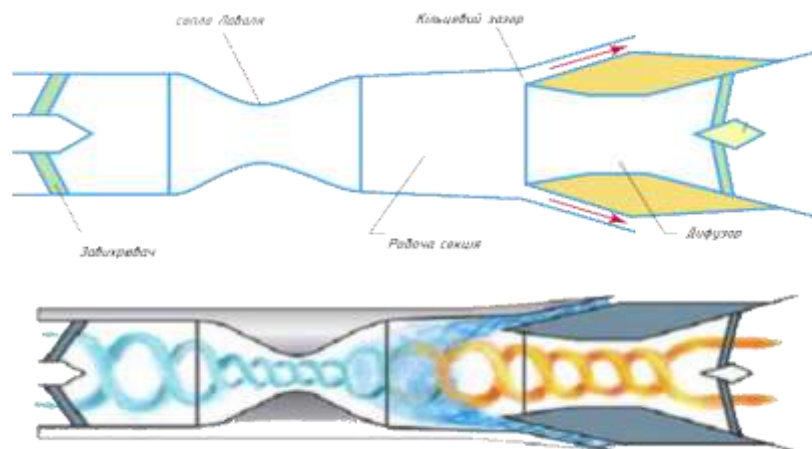


Рис. 4.4 – Конструкція та схема рухів потоків в сепараційному елементі сепаратора.

Рідка фаза в закрученому потоці концентрується на периферії і осідає на стінках сепараційної камери, після чого стікає в нижню частину сепаратора і відводиться.

В дифузорі очищений потік газу загальмовується і відновлює тиск (кінетична енергія перетворюється на тиск); виводиться з апарата.

Перевагами даного сепаратора є:

- одночасно апарат виконує функції сепаратора та ємності;
- відсутність частин, які рухаються;
- простота конструкції;
- спрощення монтажу та ремонту.

При цьому газ достатньо охолоджується; конденсація компонентів відбувається при високому вхідному тиску та низькій температурі, що збільшує кількість рідкої фази, що виділяється з потоку газу.

Вище наведені переваги конструкції даного сепаратора порівняно з аналогічними конструкціями апаратів для очистки і осушення газу дають можливість проведення процесу сепарації ефективніше.

Режимні параметри роботи установки наведені в додатку В.

4.4 Висновки до четвертого розділу.

В результаті проведення технологічного обстеження установки низькотемпературної сепарації та охолодження природного газу Гнідинцівського ГПЗ, розглянуто технологічну схему УНТС, витратні показники, режимні параметри роботи установки; наведений об'єкт дослідження, зазначені шляхи вдосконалення конструкції сепаратора; розроблена конструкція низькотемпературного газодинамічного сепаратора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лapidус А.Л., Голубева И.А., Жагфаров Ф.Г. Первичная переработка углеводородных газов. Учебное пособие. М.: 2004.- 243с.
2. Ланчаков Г.А., Кульков А.Н., Зиберт Г.К. Технологические процессы подготовки природного газа и методы расчета оборудования.-М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. - 279 с.
3. Гриценко А.И., Александров И.А., Галанин И.А. Физические методы переработки и использования газа. Учебное пособие. М.–Недра, 1981.-224 с.
4. Н.А. Фукс Механика аэрозолей. –М.: Издательство академии наук СССР, 1955. – 350с.
5. Каменских И.А. Ведерников В.А. Овчинникова В.А. Процессы и аппараты нефтяной и газовой промышленности. Учебник для вузов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2002. – 192 с.
6. Рябов А.П. Разработка и исследование технологии низкотемпературной очистки и осушки нефтяного попутного газа: автореф. дис. на получение уч. степени кандидата техн. наук: спец. 25.00.17 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»/ Рябов Александр Петрович – Т., 2007. – 20 с.
7. Николаев В.В., Бусыгина Н.В., Бусыгин И.Г. Основные процессы физической и физико-химической переработки газа. – М.: ОАО «Издательство «Недра», 1998. – 184с.
8. Врагов А.П. Процессы и оборудование газоразделительных установок: Курс лекций. – Сумы: изд-во СумГУ, 2004.
9. Бекиров Т.М Промысловая и заводская обработка природных и нефтяных газов. М. «Недра», 1980, с.293.
10. Берлин М.А., Гореченков В.Г., Волков Н.П. Переработка нефтяных и природных газов. – М.: Химия, 1981г, 472с.
11. Колокольцев С.Н. Совершенствование технологии подготовки и переработки углеводородного сырья: (на примере Коробковского ГПЗ): дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: специальность 05.17.07 Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т. - Уфа: 2007. - 230 с.

12. Романов П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. – 3-е изд. перераб. – Л.: Химия, 1982 - 288 стр.
13. Рамм В.М. «Абсорбция газов». Изд. 2-е, переработ. и доп. М., «Химия», 1976.
14. Синайский С.Г., Лапига Е.Я., Зайцев Ю.В. Сепарация многофазных многокомпонентных систем. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 621 с.
15. Электронный ресурс <http://www.fips.ru>
16. Ковальногов Н.Н. Расчет течения и сопротивления трения потока в соплах Лавая: Пособие к курсовой работе по гидрогазодинамике. – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 32 с.
17. Патент RU2161526 C1 МПК B01D53/00, B01D53/26, F25J3/00, F17D1/05, опубл. 10.01.2001. Способ подготовки природного газа.
18. Патент RU2352878 C1 МПК F25J3/08(2006.1), опубл. 20.04.2009. Способ газодинамической сепарации.
19. Патент RU2353422 C1 МПК B01D45/12 (2006.1), опубл. 27.04.2009. Газодинамический сепаратор.
20. Патент RU 2426580 C1 МПК B01D45/12 (2006.1), опубл. 11.01.2010. Устройство сепарирующее.
21. Патент UA63936 U МПК B01D53/18 (2006.01), опубл. 25.10.2011. Контактна секція.
22. Настенко О.В., Ляпощенко А.А., Михайловський Я.Э. Гидродинамика и массотеплопередача в абсорберах трубчатого типа со шнековыми элементами / Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали науковотехнічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій – Суми, 2011р., с. 96.
23. Твердохлеб А.А., Коробченко К.В., Ляпощенко А.А. Осушка и удаление тяжелых фракций из природного газа методом сверхзвуковой низкотемпературной газодинамической сепарации / Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали науковотехнічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій – Суми, 2011р., с. 107.