

поверхности ВТС. Подставляем в полученное уравнение (6) значения скорости зернового потока и температуры из экспериментального диапазона. Получаем ряд расчетных значений числа Нуссельта $Nu_{мр}$. Сравниваем расчетные числа Нуссельта ($Nu_{мр}$) и полученные в результате эксперимента ($Nu_{м}$). Для этого строим график зависимости между расчетными числами Нуссельта и экспериментальными $Nu_{мр} = f(Nu_{м})$.

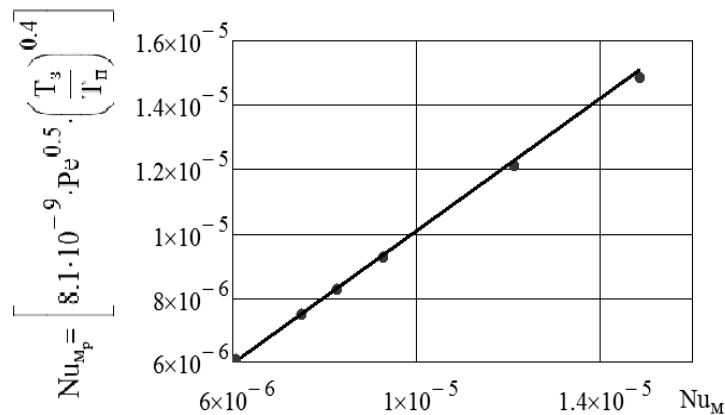


Рис. 5 – Зависимость между расчетными числами Нуссельта и экспериментальными $Nu_{мр} = f(Nu_{м})$.

Данные аппроксимируются линейной зависимостью, с коэффициентом $R^2=0,98$. Полученная модель с высокой точностью описывает полученные экспериментальные данные.

Литература

1. Современное состояние и тенденции развития мощностей по хранению зерна в хозяйствах Украины, Журнал «Хранение и переработка зерна»: <http://hipzmag.com/>
2. Атаназевич, В.И. Сушка зерна [Текст]: практ. пособие / В.И. Атаназевич - М.: Лабиринт, 1997. – 256 с.
3. Лыков, А.В. Явления переноса в капиллярнопористых телах [Текст] / А.В. Лыков— М.: Гостехиздат, 1954.
4. Бурдо, О. Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах [Текст] / О. Г. Бурдо, Л. Г. Калинин – О.: Друк, 2008. – 348 с.

УДК 66.069.84+66.074.1

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ ТА РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ТРИФАЗНОГО СЕПАРАТОРА

Ляпощенко О.О., канд. техн. наук, доцент, докторант, Павленко І.В., канд. техн. наук, старший викладач, Усик Р.Ю., магістрант, Дем'яненко М.М., бакалавр
Сумський державний університет, м. Суми

Проаналізовано існуючі конструкції сепараційних пристроїв та запропоновано їх заміну на більш енергоефективні. Досліджено вплив конструктивних і технологічних параметрів сепараційних пристроїв на гідродинаміку потоків. Розроблено методику інженерного розрахунку горизонтального трифазного сепаратора.

The existing designs of separation devices are analysed, and their replacement by more energy effective is offered. The influence of structural and technological parameters of separation devices hydrodynamics flows is studied. The technique of engineering calculation of a horizontal three-phase separator is developed.

Ключові слова: трифазний сепаратор, газодинамічний краплевловлювач, сепарація, дегазація, зневоднення, нафта, вуглеводневий газ

Нафта є основною сировиною для нафтопереробних та нафтохімічних виробництв. Продукція свердловин на нафтових родовищах являє собою багатofазну багатокomпонентну суміш, тому вона не прида-

тна для прямої переробки. Обводненість сирової нафти пластовою водою та розчиненими солями призводить до зниження якості як самої нафти, так і продуктів її переробки. Отже руйнування стійкої водонафтової емульсії і зневоднення нафти є основним процесом на промислових установках комплексної підготовки нафти (УКПН) перед подачею її на нафтопереробні заводи (НПЗ). Тому задача вдосконалення технологій підготовки нафти та розробка ресурсозберігаючого нафтопромислового обладнання поряд з традиційно застосовуваними низько енергоефективними способами та застарілими конструкціями постає сьогодні однією з актуальних проблем перед фахівцями нафтогазової промисловості.

Основним апаратом УКПН є блочний трифазний сепаратор (установка попереднього скидання (УПС) води), який використовується для дегазації нафти, її розділення на очищену нафту та пластову воду, а також вловлювання бризок з побіжного нафтового газу.

Процес дегазації в сепараторі відбувається одразу ж після того, як газорідинна суміш потрапляє до апарату. На ефективність даного процесу впливає декілька факторів. Перший фактор – це швидкість з якою газорідинна суміш потрапляє до сепаратора. Для того щоб дегазація відбувалась найбільш повноцінно, необхідно забезпечити ламінарний режим руху рідинної суміші та необхідний час перебування в апараті. Високо інтенсивні турбулентні режими призводять до інтенсивного утворення піни, яка представляє собою газорідинну систему, що складається з бульбашок побіжного нафтового газу, розділених тонкими плівками в'язкої нафти. Відомо, що при бульбашковому режимі дегазація відбувається досить повільно, як наслідок потрібний час перебування нафти в сепараторі збільшується в декілька раз. Другим фактором, який впливає на утворення бульбашок – це висота з якої рідина спадає в шар нафти. Тобто для більшої ефективності дегазації необхідно цю висоту зменшити. Останнім основним фактором, який впливає на ефективність дегазації – це наявність пристроїв для збільшення поверхні контакту фаз.

На підставі основного закону масопередачі слід зазначити, що кількість речовини, що переноситься з рідинної фази (нафтової емульсії) в газову (вуглеводневий газ) при сепарації дегазації (випаровуванні), пропорційна поверхні міжфазового контакту, рушійній силі переносу, під якою розуміється різниця парціальних тисків вуглеводневих компонентів в нафті та газі, тривалості протікання процесу та кінетичному коефіцієнту (коефіцієнт масопередачі).

Процес утворення бульбашки в рідинному потоці при умові, що вона не деформується описується наступними рівняннями. Рівняння балансу маси газу в бульбашці [1]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{iG} \right) = 4 \pi R^2 D_{im} \left(\frac{\partial \rho_{iL}}{\partial r} \right)_{r=R} \quad (1)$$

Рівняння динамічної рівноваги бульбашки – рівняння Релея [1]:

$$\rho_L \left[R R'' + \frac{3}{2} (R')^2 + 4 \nu_L \frac{1}{R} R' \right] = p_G - p_\infty - \frac{2\Sigma}{R}, \quad (2)$$

де ρ_L – густина рідкої фази, R – радіус бульбашки, ν_L – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, Σ – коефіцієнт поверхневого натягу, p_G – тиск газу в бульбашці, p_∞ – тиск на відстані від бульбашки.

Нехай, газ в бульбашці представляє собою ідеальну газову суміш. Тоді

$$p = \sum_i p_i; p_i = A T \rho_{iG} / M_i, \quad (3)$$

де p_i – парціальний тиск i -го компонента в газі, A – газова постійна, M_i – молекулярна маса i -го компонента, T – температура в газі та в розчині приймаються постійними.

Виходячи з рівняння Генрі, на границі поверхні розділу фаз маємо наступну залежність між концентрацією i -го компонента ρ_{iwG} і парціальним тиском цього ж компонента в бульбашці:

$$p_i = B_i \frac{\rho_{iwG} / M_i}{\rho_s / M_s + \sum_j \rho_{iwG} / M_j}, \quad (4)$$

де B_i – постійна Генрі, ρ_s , M_s – відповідно густина та молекулярна маса розчинника.

Для повного завершення визначення динаміки росту бульбашки в рідинному шарі до рівняння (1) – (4) додаються граничні умови:

$$\rho_{iL}(r, 0) = \rho_{i\infty}; \rho_{iL}(\infty, t) = \rho_{i\infty}; \rho_{iL}(R, t) = \rho_w; R(0) = R_0; R'(0) = 0.$$

Чиста нафта, яка не містить в собі неуглеводневих домішок (зокрема солей металів), і прісна вода взаємно нерозчинні. Тому відділення основної маси води від нафти простим відстоюванням не викликає труднощів. Проте за наявності в нафті таких домішок (хлориди натрію, кальцію і магнію, рідше – карбонати і сульфати) система нафта-вода утворює стійку важкорозділювану нафтову емульсію. Будь-яка емульсія, в тому числі і нафтова, може утворитися тільки тоді, коли механічний вплив на суміш двох взаєм-

но нерозчинних рідин викликати диспергування. Очевидно, що чим менший поверхневий натяг рідини, тим легше буде відбуватися створення крапель, тобто збільшення загальної поверхні рідини, так як воно буде вимагати меншої витрати енергії. Однак після перемішування двох чистих нерозчинних одна в одній рідин стійкість отриманої емульсії зазвичай невелика. Більш важка рідина осідає на дно, краплі дисперсної фази, стикаючись одна з одною, об'єднуються в більші (коагулюють). Обидва ці процеси і призведуть до розшаровування емульсії на два шари. Тільки у випадку вискодисперсної системи, коли діаметр крапель дисперсної фази вимірюється десятими частками мкм (10^{-7} м) і міжмолекулярні сили зрівняють гравітаційні сили, руйнування емульсії стає скрутним. Динаміку процесу збільшення крапель в полідисперсній емульсії за рахунок зіткнення та злиття (коалесценції) в просторово однорідному випадку при малому об'ємному вмісті дисперсної фази припустимо обмежуватися врахуванням тільки парних взаємодій крапель, що описується наступним кінетичним рівнянням [1]:

$$\frac{\partial n(V, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^V K(V - \omega, \omega) n(V - \omega, t) d\omega - n(V, t) \int_0^\infty K(V, \omega) n(\omega, t) d\omega, \quad (5)$$

де $n(V, t)$ – розділення крапель за об'ємами V в момент часу t , $K(V, \omega)$ – ядро кінетичного рівняння, яке має смисл частоти зіткнення крапель об'єму V та ω в одиницю об'єму дисперсної фази при одиничній концентрації цих крапель.

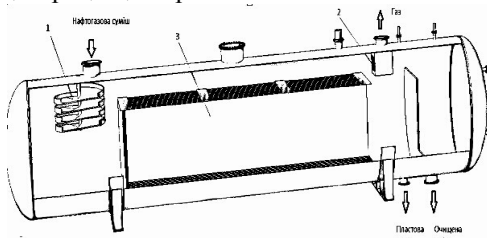


Рис. 1 – Вискоэффективный трифазный сепаратор: 1– шнековый дефлектор, 2 – газодинамический бризковловлювач, 3 – жалюзийный блок.

Перший член в правій частині рівняння відповідає швидкості створення крапель об'єму V за рахунок злиття крапель, які мають об'єми $V - \omega$ та ω , а другий – швидкість убування крапель об'єму V при коалесценції крапель об'єму V з другими краплями.

Враховуючи вищесказане пропонується замінити традиційно застосовувані у трифазних сепараторах пристрої прийому нафти у вигляді похилих ступінчатих жолобів на менш габаритний при еквівалентній площі поверхні стікаючої рідини пристрій типу шнекового дефлектора 1 (рис. 1), що забезпечить більш ефективну дегазацію нафти та створення парового простору в сепараторі для газової фази, та додатково встановити в

корпус жалюзійний блок 3 для більш ефективного розшарування фаз нафти та води, а також бризковловлювач газодинамічного типу 2 для уникнення вторинних процесів [2].

Процес вловлювання крапель з газового потоку, як правило, відбувається за рахунок сил інерції. При зміні напрямку газодисперсного потоку, в результаті обтікання пружного тіла, краплинна рідина, що міститься в газі, продовжує рухатись прямолінійно і осаджується на поверхні тіла. Оскільки в процесі сепарації газу необхідно підтримувати певну ступінь очищення газу при можливій постійній зміні витрати газорідинної суміші, за об'єкт регулювання можна прийняти гідралічний опір, регулювання якого здійснюється за допомогою сил пружності. Саме таке регулювання можливе в газодинамічному краплевловлювачі 2 (рис 1). Пружне тіло на якому осаджується краплинна рідина, під дією динамічного тиску потоку та внутрішніх напружень, що в ньому виникають, змінює свою конфігурацію. Для дослідження таких процесів необхідно вирішувати зв'язану задачу аерогідропружності: деформації пружної системи, що викликаються потоком, в свою чергу змінюють його характер впливу на систему [3]. Отже для опису процесу краплевловлювання необхідно розв'язати рівняння Нав'є-Стокса замкнуте крайовими умовами та рівнянням нерозривності (7) та рівняння Софі-Жермен (9).

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \end{cases} \quad (7)$$

де ρ – густина газу або рідини; $\vec{v} = \vec{v}(x, y, z, t)$ – вектор швидкості газу або рідини, S_m – джерело;

де p – гідростатичний тиск; $\vec{\tau}$ – тензор напружень; $\rho \vec{g}$ – питома гравітаційна сила; $\vec{F}$ – питома об'ємна сила.

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (8)$$

де μ – динамічна в'язкість; I – одиничний тензор, другого рангу.

$$D \cdot \nabla^2 \cdot W = p(x, y, t) \quad (9)$$

де W – функція прогину; D – циліндрична жорсткість; $p(x,y,t)$ – нормальне до серединної площини навантаження.

Для визначення оптимальних умов та режимів досліджуваних процесів було проведено ряд факторних експериментів на експериментальних установках, а також здійснено комп'ютерне моделювання дослідних зразків за допомогою систем скінченно-елементного аналізу механіки рідини і газу, тепло- та масопереносу, а також механіки конструкцій.

Для моделювання гідродинамічних процесів при дегазації в шнековому дефлекторі застосовано модель течії з вільною поверхнею системи обчислювальної гідродинаміки FlowVision. (рис. 2). Моделюваннями в тому ж програмному комплексі процесів розшарування емульсії у встановленому в робочий об'єм сепаратора жалюзійного блоку для коалесценції доведено підвищення ефективності розділення двофазного потоку на дві складові - нафту та пластову воду. Жалюзійні перегородки в робочому об'ємі сепаратора утворюють канали, які розбивають рідину на досить невеликі сегментні потоки, в яких легше відбувається процес злиття водяних крапель та осадження їх в емульсії.

Аналітичне вирішення вищевказаних рівнянь для динамічного крапле вловлювання є ускладненим процесом. Завдяки розвитку сучасним можливостям комп'ютерної техніки та програмного забезпечення здійснено спробу скористатися програмним комплексом ANSYS Workbench, а саме його модулями FLUENT Flow і Transient Structural, в яких реалізовані методи скінченних об'ємів та елементів, відповідно. Розрахунок проводиться за ітераційною процедурою. Розрахунки проведені для значень вхідної швидкості 2-4 м/с, об'ємної частки рідини $2 \cdot 10^{-4}$ з розмірами краплин у межах 1-100 мкм. На рис.3 подані результати чисельного розрахунку: ізолінії об'ємної частки води у серединному перерізі, поля тиску і локальних швидкостей газорідного потоку для середньооб'ємної швидкості газорідного потоку на вході 3,3 м/с та розміру краплин 10 мкм.

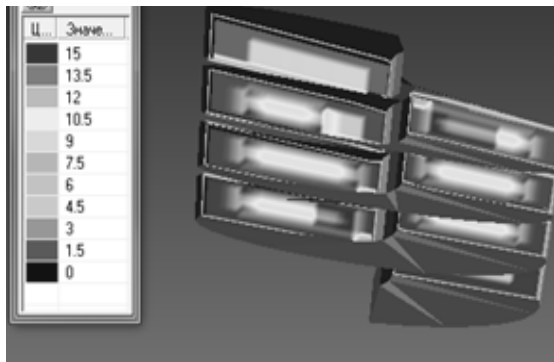


Рис. 2 – Комп'ютерне моделювання гідродинамічних процесів у шнековому входному пристрої (FlowVision)

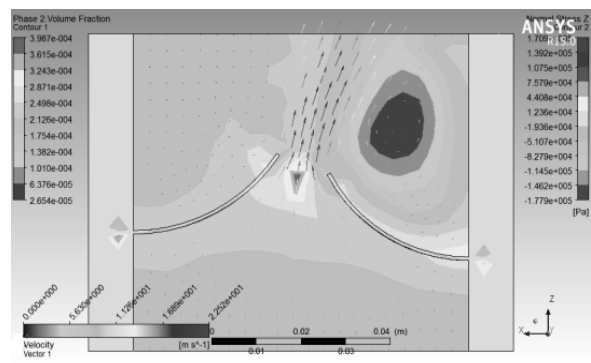


Рис. 3 – Візуалізація результатів чисельного моделювання газодинамічного бризко вловлювача (ANSYS)

У результаті моделювань з'ясовано, що в досліджуваній конструкції газодинамічного пристрою для сепарації газорідного потоку при збільшенні швидкості газового потоку можливі зриви плівки з поверхні лопаток. З'ясовано, що для зменшення вірогідності руйнування плівки необхідно зробити скоси вільних від закріплення пластин та встановити їх під гострим кутом до траєкторії руху газорідного потоку. Експериментально визначено, що у пропонованому типі газодинамічних сепараторів ефективно вловлюються частки (краплі рідини) з розмірами більше 10 мкм.

Враховуючи те, що на сьогоднішній день розрахунок даного типу нафтогазового обладнання ускладнюється відсутністю методик розрахунку, запропоновано новий підхід до розробки спрощеної інженерної методики, що дозволяє провести технологічний та конструктивний розрахунок при проектуванні трифазних сепараторів такого типу.

Здійснюють розрахунок матеріального балансу газорідної суміші, при цьому продуктивність сепаратора по газу визначається максимальною швидкістю газу, при якій краплі нафти встигнуть осісти в газовому середовищі. Дану швидкість можна обчислити на підставі рівняння Саудерса-Брауна [4]:

$$U_{\max} = k \cdot \sqrt{(\rho_{\text{нефти}} - \rho_{\text{г}}) / \rho_{\text{г}}} \quad (10)$$

Для запобігання утворенню турбулентних завихрень між нафтовою і водною фазами, аксіальні швидкості руху цих двох фаз повинні бути постійні, виходячи з цього розраховують мінімальну площу перерізу сепаратора, необхідну для розділення водної та нафтової фаз, а звідти і діаметр сепаратора.

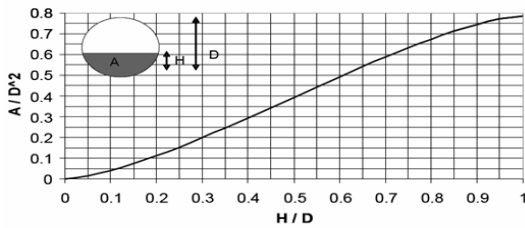


Рис. 4 – Залежність кількості рідини від рівня розділу фаз в горизонтальному сепараторі

Рівень шару рідини при відомій площі сегмента, зайнятого цією рідиною, може бути розрахований в аналітичній формі, однак більш зручно користуватися спеціальною діаграмою (рис. 4) [4], яка дозволяє легко переходити від площі, зайнятої фазою, до діаметру.

Далі розраховуються основні технологічні параметри та геометричні розміри шнекового дефлектора розподільника газорідинної суміші, виходячи з умови протікання процесу дегазації.

Розрахунок пристрою коалесценції являє собою визначення кількості перегородок та їх довжини. Довжина одного періоду гофрованої пластини синусоїдального профілю

$$L = l/2\pi \int_0^{2\pi} \sqrt{1+4\pi^2(a/l)^2 \cos^2 \bar{x}} d\bar{x}, \quad (11)$$

де a, l – амплітуда і період синусоїди; $\bar{x} = 2\pi \cdot x / l$ – безрозмірна координата.

Промислову апробацію основних наукових результатів роботи здійснено під час виконання науковцями кафедри процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв Сумського державного університету держбюджетної науково-дослідної роботи за темою «Дослідження гідродинамічних та масотеплообмінних характеристик пристроїв з вихровими та високотурбулізованими одно та двофазними потоками» (ДР №0110U002632).

Висновки. На підставі розробленої фізичної моделі гідродинамічних процесів та в результаті проведених досліджень та моделювань доведено підвищення ефективності сепарації шляхом вдосконалення конструкції горизонтального трифазного сепаратора (встановлення шнекового дефлектора, жалюзійного блоку та газодинамічного бризковловлювача), а також запропоновано науковий підхід до інженерної методики для його розрахунку.

За допомогою комп'ютерного моделювання визначено гідродинамічні параметри руху потоку у шнековому дефлекторі, удосконалено запропоновану конструкцію газодинамічного бризковловлювача шляхом встановлення пружних елементів під гострим кутом до руху газорідинного потоку та їх скосу. Подальші роботи будуть направлені на аналітичне розв'язання задачі аерогідропружності для газодинамічного краплевловлювача.

Література

1. Синайский Э.Г., Лапица Е.Я., Зайцев Ю.В. Сепарация многофазных многокомпонентных систем. – М.:Недра, 2002. – 622с.
2. Заявка на корисну модель U 201413067 Україна. Пристрій для вловлювання вискодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку / Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Настенко О.В., Усик Р.Ю. від 05.12.14 р.
3. Вольмир А. Оболочки в потоке жидкости и газа (задачи аероупругости) – «Наука», 1976. – 416 с.
4. Лутошкин Г.С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды. — М.: Недра, 1979. — 319с.