

ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИЩИХ ВУГЛЕВОДНІВ НА ОСНОВІ ЯВИЩА УЛЬТРАЗВУКОВОЇ КАВІТАЦІЇ ТА РЕЗОНАНСУ

Вступ

Одним з призначень нафтопереробної галузі є отримання високооктанових бензинів [1]. Важливим залишається комбінований процес на основі холодного крекінгу, який використовує явище ультразвукової кавітації та резонансу. В свою чергу, резонанс призводить до збігу власної частоти коливань кавітаційної бульбашки з частотою коливань міжмолекулярних зв'язків рідинного середовища. За рахунок отримання коротких молекулярних ланцюгів енергоносія відбуваються його структурні зміни. Як первинне джерело ультразвукових коливань використовується гідродинамічний перетворювач [2], за допомогою якого відбувається трансформація частоти. Порівняно з іншими [2], генератор має переваги: простота конструкції та обслуговування, невеликі матеріальні затрати на виготовлення (1/5 вартості звичайних апаратів з цієї ж продуктивністю), високий коефіцієнт корисної дії (50...60 %).

Фізика процесу ультразвукової реструктуризації вуглеводнів

Одна з особливостей ультразвуку полягає в тому, що при поширенні в рідині він викликає явище кавітації [3]. Кавітацією в гідравліці називають порушення суцільності потоку рідини з утворенням у ній порожнеч. Присутні в рідині кавітаційні бульбашки пари і газу за певних умов набувають здатність змінювати розміри та питому поверхневу енергію.

Перемішуючись з потоком рідини, вони потрапляють в ділянки з тиском вище критичного, під дією якого захлопуються. Захлопування бульбашок відбувається з великою швидкістю і супроводжується гідравлічним ударом. При захлопуванні цих бульбашок на відстані 1,5 радіуса бульбашки виникають миттєві локальні тиски, величина яких досягає тисяч атмосфер, та локальні температури до 10000 °С [3]. Енергія, яка виділяється при руйнуванні кавітаційних бульбашок, використовується для розриву хімічних зв'язків між атомами великих молекул вуглеводневих з'єднань. Розрив хімічних зв'язків можна здійснити в будь-якому хімічному з'єднанні при інтенсивності звуку, яка б відповідала міцності енергії зв'язку. У місці розриву хімічного зв'язку має бути приєднаний який-небудь радикал. При нестачі вільних радикалів в реагуючому середовищі молекули з ненасиченим зв'язком можуть звернутися в кільце, утворюючи циклічні або ароматичні з'єднання. Окрім процесу ароматизації в ультразвуковому активаторі можна здійснити алкілювання, ізомеризацію та інші процеси переробки вуглеводнів. Таким чином, як вторинне джерело виступає сама кавітаційна бульбашка.

Установка для реструктуризації вуглеводнів

Насос Н (рис.1) нагнітає бензин з низьким октановим числом з ємності 1 через дозатор в

насос високого тиску НВТ, який приводить в дію генератор акустичних коливань ГАК та гідродинамічний ультразвуковий генератор ГУГ. В свою чергу, ГАК завдяки вібрації з акустичною частотою і ГУГ з ультразвуковою частотою приводять суміш в гомогенний стан на молекулярному рівні в кавітаційній камері КК. Витратомір В контролює вихід кінцевого продукту в накопичуючу ємність 2. Засувки 3 пропускають бензин, що нагнітається насосом Н, в потрібному напрямку.

Ця установка руйнує міжмолекулярні зв'язки під впливом ультразвукових потоків. За рахунок отримання коротких молекулярних ланцюгів енергоносія покращується його якість.

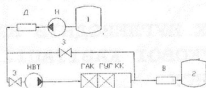


Рис. 1. Установка для реструктуризації вуглеводнів

Частота коливання ультразвукового поля наближається до власної частоти коливання електромагнітних зв'язків. Їх взаємодія проходить в умовах, близьких до резонансних, що значно підвищує коефіцієнт корисної дії процесу руйнування міжмолекулярних зв'язків. Зовнішнім джерелом енергії в гідрокавітаційній системі є генератор акустичних коливань (ГАК) (рисунок 2).

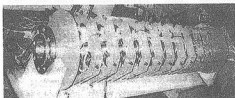


Рис. 2. Генератор акустичних коливань

До складу ГАК входять 44 випромінювачі, розташовані вздовж вібратора у вигляді одинадцяти окремих блоків. У блоці знаходяться чотири ультразвукових випромінювачі, розташованих по зовнішній поверхні резонатора під кутом 90° один відносно одного. До випромінювачів за допомогою шпильки притискається демпфер. Для фіксації випромінювачів по зовнішній поверхні резонатора використовується блок, складений з хомутів. Хомути притискаються за допомогою болтів. Притискавальна сила регулюється по мірі закручення болтів. Для електробезпеки та запобігання механічним пошкодженням на

ГАК надівається кожух. Кожух кріпиться на вхідний та вихідний каркас відповідно. Каркаси надіваються на втулки, які, в свою чергу, насаджені на резонатор. Для запобігання зсуву втулок вздовж резонатора вони притискаються до резонатора болтами.

Принцип роботи ГАК полягає в наступному. До кожного джерела акустичних коливань (ДАК) підводиться високочастотна енергія. В резонаторі створюється ультразвукове поле, що дозволяє впливати на рідину. При цьому можливо регулювати продуктивність пристрою і час акустичного опрацювання проточної рідини. Блок електроніки, який подає напругу на ГАК, розташований на деякій відстані від ДАК і з'єднаний з ним кабелем. За рахунок симетричного положення ДАК навколо робочого трубопроводу створені умови для виникнення стоячих хвиль. Вузли стоячої хвилі відстоять один від одного на однакових відстанях. Зусилля, які діють в ультразвуковому полі на дві сферичні частки, що розміщені поряд, намагаються зблизити їх. Сукупність цих сил, яка діє на часточки звукового потоку, призводить до утворення таких шарів, які орієнтовано поперек потоку.

Частотний діапазон коливань ультразвукових генераторів складає від 20 кГц до 1 МГц. Для того, щоб перекрити весь діапазон частот, в установці для реструктуризації вуглеводнів також застосовано гідродинамічний перетворювач. Він працює на великих частотах (від 500 кГц до 1 МГц) [2].

Принцип роботи гідродинамічного перетворювача заснований на відомому в акустиці положенні [2]: при витканні струменя рідини з щілини на гостре ребро (пластину) створюється періодичне підвищення тиску унаслідок вихорів, які поперемінно виникають ліворуч і праворуч від вістря. Щоб підтримати первісне переривання вихорів, потрібна певна відстань між пластиною і щілиною. Тиск струменя рідини надає рух металевій пластинці, частота коливань якої буде тим вища, чим більша швидкість потоку рідини і чим менша відстань між торцем пластини і соплом, з якого подається рідина.

В гідродинамічних резонаторах [2] пружні коливання отримуються за допомогою прямокутної пластини, що може бути закріплена або в двох вузлових точках, або консольно. При закріпленні пластини в двох вузлових точках 4 (рис. 3) рідина, що витікає під тиском з великою швидкістю із сопла 1,

потрапляє на торець металеві пластини 2 зі скошеними ребрами 3 і змушує її коливатися.

При правильному виборі швидкості витікання гідравлічного струменя і відстані між соплом і резонатором (пластиною) виникають резонансні коливання, за рахунок яких в середовищі поширюються звукові й ультразвукові хвилі.

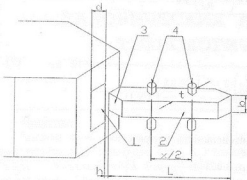


Рис. 3. Схема гідродинамічного перетворювача

Гідродинамічний резонатор, що працює за такою схемою, перетворює механічну енергію в ультразвукову. Власна частота коливань пластини при першому наближенні і закріпленні її в двох точках визначається за формулою [2]:

$$f = \frac{22,4 \cdot t}{4\pi \cdot l^2 \cdot \sqrt{3}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{22,4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \sqrt{3}} \times \sqrt{\frac{171 \cdot 10^{11}}{6,2 \cdot 10^3}} = 1,35 \cdot 10^7 \text{ Гц}, \quad (1)$$

де f - власна частота коливань пластини, Гц;

$t = 1 \cdot 10^{-3}$ - товщина пластини, м;

$E = 171 \cdot 10^{11}$ - модуль пружності для пермендору, Па [4];

$l = 2 \cdot 10^{-3}$ - довжина пластини, м;

$\rho = 6,2 \cdot 10^3$ - щільність пермендору, кг/м³ [4].

Швидкість витікання рідини впливає у визначених межах на частоту коливань пластини.

Встановлено [2], що пластинка гідродинамічного резонатора повинна відповідати наступним вимогам:

- кут заточення краю пластини $\alpha = 30^\circ$;
- відстань між точками закріплення $\frac{x}{2}$ дорівнює половині довжини пластини l ;
- ширина щілини d менша ширини пластини t ;

- довжина пластини l більша ніж подвійна висота пластини $2b$.

Математична модель ультразвукової кавітації

Частота коливань кавітаційної бульбашки f емпірично оцінюється величинами чисел Струхалія та Рейнольдса [5]:

$$f = \frac{Sh \cdot V}{d}, \quad (2)$$

де $Sh = 0,21 \cdot \left(1 - \frac{20}{Re}\right)$ - число Струхалія;

$V = 1170$ - швидкість ультразвукової хвилі в бензині, м/с [6],

Re - число Рейнольдса.

Згідно з Мінертом та Смітом резонансна частота визначається [4]:

$$f = \frac{1}{\pi d} \cdot \sqrt{\frac{3\lambda}{\rho} \cdot \left(p_0 + \frac{4\sigma}{d}\right)}, \quad (3)$$

де $\lambda = 0,8$ - відношення питомих теплоспоностей газу в бульбашці [4];

$p_0 = 2 \cdot 10^5$ - гідростатичний тиск, Па [4];

$\sigma = 5 \cdot 10^{-2}$ - поверхневий натяг, Н/м [4];

d - діаметр кавітаційної бульбашки, м;

$\rho = 879$ - щільність бензину, кг/м³ [6].

Прирівнюючи вирази (2) та (3), отримаємо:

$$\frac{Sh \cdot V}{d} = \frac{1}{\pi d} \cdot \sqrt{\frac{3\lambda}{\rho} \cdot \left(p_0 + \frac{4\sigma}{d}\right)} \quad (4)$$

Діаметр кавітаційної бульбашки з виразу (4).

$$d = \frac{12 \cdot \sigma \cdot \lambda}{Sh^2 \cdot V^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho - 3 \cdot \lambda \cdot p_0} \quad (5)$$

Діаметр кавітаційної бульбашки з урахуванням числа Рейнольдса:

$$d = \frac{12 \cdot \sigma \cdot \lambda}{0,21^2 \cdot \left(1 - \frac{20}{Re}\right)^2 \cdot V^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho - 3 \cdot \lambda \cdot p_0} \quad (6)$$

Підставляючи вираз (6) в вираз (3), отримаємо резонансну частоту, що залежить від числа Рейнольдса:

$$f = \frac{Sh \cdot V}{d} = \frac{0,21 \cdot \left(1 - \frac{20}{Re}\right) \cdot V}{\frac{12 \cdot \sigma \cdot \lambda}{0,21^2 \cdot \left(1 - \frac{20}{Re}\right)^2 \cdot V^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho - 3 \cdot \lambda \cdot p_0}} = \frac{0,21^3 \cdot \left(1 - \frac{20}{Re}\right)^3 \cdot V^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho - 3 \cdot 0,21 \cdot \left(1 - \frac{20}{Re}\right) \cdot p_0 \cdot V \cdot \lambda}{12 \cdot \sigma \cdot \lambda} =$$

$$= \frac{0.21^3 \cdot \left(1 - \frac{20}{2320}\right)^3 \cdot 1170^3 \cdot \pi^2 \cdot 879 - 3 \cdot 0.21 \cdot \left(1 - \frac{20}{2320}\right) \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 1170 \cdot 0.8}{12 \cdot 5 \cdot 10^2 \cdot 0.8} = 2.6 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}. \quad (7)$$

Відомо [7], що власна частота коливань міжмолекулярних зв'язків бензину складає 1011...1013 с⁻¹. Амплітуда коливань частинок складає:

$$A = \frac{P_0}{2\pi \cdot f \cdot \rho \cdot V} = \frac{P_0}{2\pi \cdot \left(\frac{0.21^3 \cdot \left(1 - \frac{20}{Re}\right)^3 \cdot V^3 \cdot \pi^2 \cdot \rho - 3 \cdot 0.21 \cdot \left(1 - \frac{20}{Re}\right) \cdot \rho_0 \cdot V \cdot \lambda}{12 \cdot \sigma \cdot \lambda} \right) \cdot \rho \cdot V} = \frac{2 \cdot 10^5}{2.3 \cdot 14 \cdot \left(\frac{0.21^3 \cdot \left(1 - \frac{20}{2320}\right)^3 \cdot 1170^3 \cdot \pi^2 \cdot 879 - 3 \cdot 0.21 \cdot \left(1 - \frac{20}{2320}\right) \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 1170 \cdot 0.8}{12 \cdot 5 \cdot 10^2 \cdot 0.8} \right) \cdot 879 \cdot 1170} = 1.19 \cdot 10^{-9} \text{ м}, \quad (8)$$

Максимальна, обмежена виникненням кавітації, інтенсивність ультразвуку:

$$I = 2 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot V \cdot A^2 \cdot f^2 = 2 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot V \cdot A^2 \cdot \left(\frac{0.21^3 \cdot \left(1 - \frac{20}{Re}\right)^3 \cdot V^3 \cdot \pi^2 \cdot \rho - 3 \cdot 0.21 \cdot \left(1 - \frac{20}{Re}\right) \cdot \rho_0 \cdot V \cdot \lambda}{12 \cdot \sigma \cdot \lambda} \right)^2 = 2 \cdot 3.14^2 \cdot 879 \cdot 1170 \cdot (1.19 \cdot 10^{-9})^2 \cdot \left(\frac{0.21 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - \frac{20}{2320}\right)^3 \cdot 1170^3 \cdot \pi^2 \cdot 879 - 3 \cdot 0.21 \cdot \left(1 - \frac{20}{2320}\right) \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 1170 \cdot 0.8}{12 \cdot 5 \cdot 10^2 \cdot 0.8} \right)^2 = 19.4 \text{ кВт/м}^2. \quad (9)$$

Висновки

1. Розроблено установку для реструктуризації вуглеводнів. Вона відрізняється від існуючих установок тим, що з метою охоплення всього діапазону частот (від 20кГц до 1 МГц) використано генератор акустичних коливань ГАК та гідродинамічний ультразвуковий генератор ГУГ. Наукова новизна даної розробки полягає у створенні в енергоносії умов близьких до резонансних за допомогою явища ультразвукової кавітації.
2. Розроблено математичні моделі резонансної частоти, амплітуди коливань та інтенсивності ультразвуку, які одночасно враховують число Рейнольдса, швидкість ультразвукової хвилі та щільність бензину, гідростатичний тиск, відношення питомих теплоємностей газу в бульбашці та поверхневий натяг; в результаті розрахунку цих моделей отримано наступні значення: частота коливань кавітаційної бульбашки $f = 2,6 \cdot 10^7$ Гц; амплітуда коливань частинок $A = 1,19 \cdot 10^{-9}$ м; інтенсивність ультразвуку $I = 19,4$ кВт/м².

Література

1. Попов В.Ф. Ультразвук и его применение в химической промышленности. - М.: Мир, 1959. - 54 с.
2. Фридман В.М. Ультразвуковая и химико-технологическая аппаратура. - М.: Наука, 1964. - 259 с.
3. Кнэпс Р., Дейли Дж., Хэмми Ф. Кавитация. - М.: Мир, 1974. - 687 с.
4. Бергман Людвиг. Ультразвук и его применение в науке и технике. - М.: Мир, изд. 2-е, 1957.
5. Иванов А. Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений. - Л.: Судостроение, 1980. - 238 с.
6. Марков А. И. Применение ультразвука в промышленности. - М.: «Машиностроение», 1975. - 240 с.
7. Енохович А. С. Краткий справочник по физике. Изд. 2-е, «Высш. Школа», 1976. - 288 с.
8. Бабилов О. И. Ультразвук и его применение в промышленности. - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958.