



Технология добычи и переработки нефти с гидродинамическим ультразвуковым депарафинизатором насосно-компрессорных труб

В.С. Аникин, В.В. Аникин
(Рязанский университет)

Technology of oil recovery and oil refining with hydrodynamic ultrasonic dewaxer of oil-well tubing

V.S. Anikin, V.V. Anikin
(Ryazan University)

В настоящее время для борьбы с отложениями парафинов на стенках НКТ применяют механические фрезы, ингибиторы, обработку горячими нефтепродуктами, электрообогрев скважины, НКТ с внутренней поверхностью, обладающей гидрофильными свойствами, а также методы, основанные на использовании постоянных магнитов, ультразвука. Однако применение известных устройств на основе этих методов не достаточно эффективно. Фирма Durango Industries предлагает депарафинизатор ENERCAT, где электромагнитные волны генерируются с помощью кристаллов кварца, который, однако, не выдерживает сильное электрическое поле, создаваемое установленными электропорожними насосами.

Ультразвук влияет на изменение физико-химических характеристик продукта, разрушая молекулярные связи, поэтому решение задачи деструкции нефти возможно при достижении достаточной для деструкции плотности облучения при заданной частотной характеристике. Изменение физико-химических свойств продуктов возможно также путем передачи жидкости энергии колебательных процессов различных гидродинамических ультразвуковых излучателей с пластинчатыми, стержневыми, мембранными резонансными колебательными устройствами в вихревых, струйных и роторно-пульсационных кавитационных аппаратах (кавитаторах), в которых гидродинамическая кавитация ведет к генерации акустических, в том числе ультразвуковых, колебаний [1]. Однако достигаемая плотность ультразвукового облучения с помощью этих аппаратов недостаточна для деструкции парафинов в потоке нефти.

Известны способ интенсификации химических реакций [2], при котором звуковую энергию - источник ионизации молекул продукта вводят в жидкую среду в области контакта реагентов в реакционной камере, а звуковые преобразователи заданных частот и энергий расположены в потоке реагентов, а также способ ультразвукового воздействия на среду для диспергирования частиц парафина в нефти до устойчивого состояния. При этом частицы не налипают на стенки нефтепромыслового оборудования [3]. К недостаткам способов относится необходимость применения звуковых преобразователей с определенными частотными и мощностными характеристиками, а также сложность реализации «озвучивания» промышленных объемов продукта.

Способы интенсификации тепломассоэнергообмена методом акустического резонансного возбуждения вихревых потоков [4], когда последние создаются с помощью тангенциально расположенных входных сопел, также имеют недостатки (сложность достижения высокой плотности облучения продукта в заданном частотном диапазоне при заданной производительности). Невозможность достижения высокой плотности облучения в задан-

The hydrodynamic ultrasonic device of hydrocarbons destruction on the basis of a method of acoustic resonant excitation of a vortex flow and hydrodynamic ultrasonic dewaxer, used for asphalt-resin-paraffin deposits prevention, are developed. The capability of mechanical separation of asphalt-resin-paraffin component from the oil-well tubing output and substantial growth of light ends yield at cracking are established.

ных частотных диапазонах при заданной производительности ограничивает возможность использования способа ультразвукового воздействия для эффективных тепломассоэнергообменных процессов при обработке нефти ультразвуковыми устройствами.

Постановка задачи и методы ее решения

Задачей является создание такого способа акустического воздействия на поток углеводородов, при котором осуществляется безвозвратное изменение молекулярного состава углеводородов за счет создания вихревого потока с максимальной энергией акустического резонансного возбуждения потока продуктов в заданном частотном диапазоне. Это позволяет:

- обеспечить достаточные для деструкции длительность и мощность резонансного возбуждения продукта за счет оптимального деформационно-сдвигового взаимодействия потока с поверхностью вихревых труб и, как следствие, с возбуждением вынужденных виброакустических колебаний;
- создать турбулентные вихри и кавитационный процесс в вихревом потоке, приводящий к акустической деструкции дисперсно-агрегатного состояния продукта и преобразованию химических связей;
- использовать тепломассоэнергообменный процесс вихревого потока для преобразований продукта;
- исключить необходимость проведения трудоемких и дорогостоящих работ по депарафинизации скважин;
- увеличить срок службы и эффективность работы нефтепромыслового оборудования.

Поставленная задача решается с помощью разработанного гидродинамического ультразвукового депарафинизатора (ГУД), используемого для предотвращения и удаления отложений парафинов, асфальтенов и смол при добыче нефти. Устройство может

быть установлено в скважине и соединено с колонной НКТ с помощью резьбового соединения. Скважинный насос подает нефть в ГУД, из которого обработанная нефть по НКТ подается на поверхность земли и отводится в накопительные емкости. Устройство работает на основе тепломассоэнергообменного процесса по методу акустического резонансного возбуждения одного или нескольких вихревых потоков, создаваемых в вихревых трубах переменного сечения. Под воздействием ультразвука большой интенсивности «озвучивания» нарушаются связи в молекулах парафина, смол и других составляющих нефти, вследствие чего изменяются физико-химические характеристики продукта. Деструкция нефти происходит как в рабочих цилиндрах, так и в специальной камере озвучивания, в которую нефть попадает после рабочих цилиндров. Возбуждение кавитационных процессов осуществляется за счет конструкции рабочего цилиндра с завихрителями потока.

Максимальная мощность виброакустических колебаний в устройстве достигается при максимальных линейных скоростях вихревых потоков и создании в устройстве зон неустойчивой турбулентности. Для этого поперечное сечение вихревых труб делается разного диаметра (переменное сечение). В зоне максимальных линейных скоростей потока помещены завихрители потока, которые воспринимают гидромеханические импульсы, вызывающие виброакустические колебания элементов устройства. Сопротивление стенок вихревых труб также учитывается при определении переменного сечения при решении вариационной задачи расчета наилучшей геометрии рабочих цилиндров. Специальные стержни, расположенные в центрах рабочих цилиндров, находятся в зоне повышенной неустойчивости течений, усиливаемых завихрителями потока. Центральные стержни, принимая от потока сложные гидромеханические переменные импульсы, находятся в области гидроакустической кавитации. В результате все элементы вихревого реактора и в большей степени стержни испытывают вынужденные колебания.

Скважинное оборудование в отличие от наземного находится в условиях повышенного давления, характеризуется относительно малыми размерами и небольшой производительностью. Временная или безвозвратная деструкция углеводородов нефти непосредственно в скважине с помощью ГУД предотвращает образование АСПО. Этому способствуют большое давление в скважине, кавитационный процесс, деформационно-сдвиговые воздействия на продукт и его акустическая обработка.

Моделирование гидродинамики вихревого реактора

Интенсификация тепломассоэнергообмена в физико-химическом процессе превращений методом акустического резонансного возбуждения вихревых потоков осуществляется с помощью вихревых труб переменного сечения с завихрителями потока, расположенными в зонах максимальных скоростей. В вихревой трубе, образованной внешней поверхностью 2 и внутренней стержневой 3 с выходным отверстием 5 (рис. 1), создается турбулентный кавитирующий вихревой поток, подвергающийся деформационно-сдвиговым воздействиям при взаимодействии с поверхностью трубы, на которой располагаются специальные турбулирующие поток конструктивы 1 - завихрители потока. Их число и расположение могут быть различными. Вихревой поток формируется с помощью тангенциально расположенного входного сопла 4, в которое продукт поступает под давлением от внешнего источника, например, насоса или компрессора. Число входов может быть различным, они могут быть распределены как по длине трубы, так и в плоскости, перпендикулярной оси трубы. Энергия вихревого потока, пропорциональная его расходу Q , разности давлений на входе и выходе устройства $p_{вх} - p_{вых}$, расходуется на деформационно-сдвиговые воздействия, разрывы

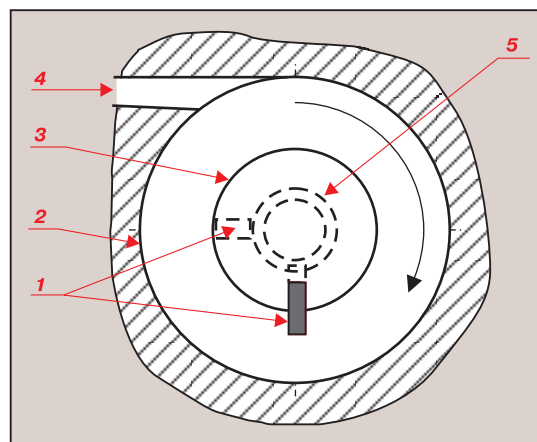


Рис. 1. Схема цилиндра вихревой трубы с центральным стержнем переменного сечения

плотности потока, создание кавитационного процесса и преодоление сил трения потока со стенками вихревой трубы. При этом стержень находится в зоне неустойчивости центра вихря и воспринимает сложные переменные гидромеханические импульсы кавитационного процесса. Это приводит к вынужденным виброакустическим колебаниям как стержней, так и всего устройства. Энергия и спектр акустического поля озвучивания потока в ультразвуковом диапазоне суммируются из энергии колебательных процессов в самой жидкости за счет кавитации и акустической энергии за счет вибро-акустических колебаний конструктивов устройства. В связи с отмеченным важной задачей является расчет собственных частот устройства, которые должны быть равными заданным для эффективной деструкции нефти. Кроме вводов жидкого продукта, в наземных устройствах можно использовать ввод газообразного продукта - газа для генерации более мощных акустических колебаний. Второй ввод, выполненный в виде газоструйного генератора [1], способствует эффективной обработке продукта на заданной частоте с акустической мощностью $N_a = 330 \cdot s_c \sqrt{p-0,9}$ (s_c - площадь входного сопла, см²; p - давление газообразного продукта, атм), которая может значительно превышать мощность акустических колебаний за счет гидродинамической составляющей [1].

Приближенно энергию кольца вихря (рис. 2) можно представить в виде (Р.Е. Шестов, 1966 г.)

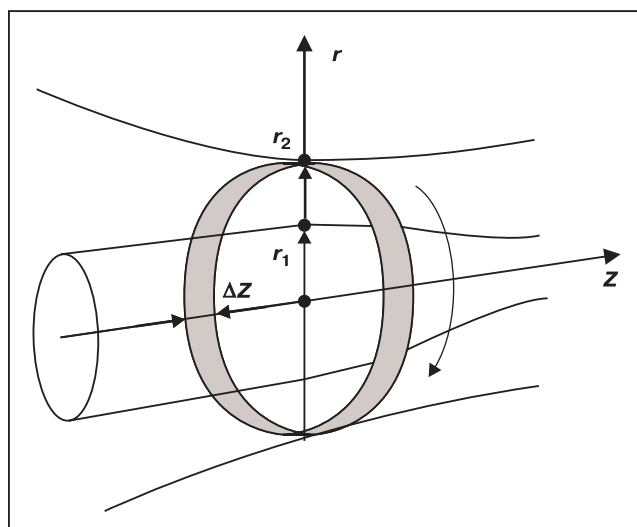


Рис. 2. Схема элемента потока вихря в вихревой трубе

$$E_k = \int_0^{r_2} \int_0^{2\pi} \frac{(v_\tau)^2}{2} (\rho \Delta z r d\varphi dr) = \frac{\pi \rho v^2 \Delta z}{2-2n} (r_2^{2-2n} - r_1^{2-2n}) r_2^{2n}, \quad (1)$$

где $v_\tau = v(r_2/r_1)^n$ - тангенциальная скорость у внешней границы элемента вихря массой $\Delta m = r \Delta z r d\varphi dr$; ρ - плотность продукта; Δz - ширина кольца вихря; $n < 1$ - коэффициент, учитывающий вязкость жидкости и корректирующий условие $v_\tau r = \text{const}$, которое получается из решения уравнения Навье - Стокса для вихря идеальной жидкости; r_1, r_2 - соответственно внутренний и внешний радиус кольца вихря.

Время продвижения продуктом пути Δz составит $t_z = \pi(r_2^2 - r_1^2) \Delta z / Q$, откуда длина траектории торможения внешних элементов кольца $l_2 = t_z v$, внутренних $l_1 = t_z v (r_2/r_1)^n$. Кольцо тормозится за счет трения о стенки вихревой трубы и соударения с конструктивным завихрителем потока, поэтому для построения приближенной математической модели гидродинамики турбулентного вихря удобно использовать эффективную площадь торможения за счет завихрителя $s_T \Delta z = s_T(z, \eta) \Delta z$, определяемую расстановкой завихрителей и их эффективной площадью торможения, а также коэффициентом вязкости жидкости η . Тогда энергия кольца E_k за время t_z уменьшится на величину

$$\Delta z \cdot s_{T2} l_2 \rho \frac{v^2}{2} + \Delta z \cdot s_{T1} l_1 \rho \frac{v^2 (r_2/r_1)^{2n}}{2}, \text{ если } s_{T2} \Delta z, s_{T1} \Delta z -$$

эффективная площадь завихрителей потока, расположенных соответственно на внешней и внутренней поверхности вихревой трубы. С учетом последнего соотношения и выражения (1) уравнение баланса энергии кольца примет вид

$$E_k - [s_{T2} l_2 \rho \frac{v^2}{2} + s_{T1} l_1 \rho \frac{v^2 (r_2/r_1)^{2n}}{2}] \Delta z = \frac{\pi \rho (v + \Delta v)^2 \Delta z}{2-2n} (r_2^{2-2n} - r_1^{2-2n}) r_2^{2n}, \quad (2)$$

где Δv - изменение тангенциальной скорости.

Коэффициент $n=1$ получается из решения уравнения гидродинамики для вихревого потока идеальной жидкости, при $n < 1$ функция $v(r)$ получается по результатам экспериментальных исследований гидродинамики вихревого потока в гидроджиклоне и зависит от числа Рейнольдса Re , которое для предлагаемой модели $Re = 2r_2 v (r_2/r_1)^n / \nu$ (ν - коэффициент кинематической вязкости). В уравнении (2) величина s_T для идеальной жидкости соответствует высоте завихрителя потока и изменяется пропорционально динамической вязкости жидкости η . Уравнение (2) можно преобразовать к виду $f(r_1, r_2) \Delta z = \Delta v / v^2$, решая следующее из этого соотношения дифференциальное уравнение для тангенциальной скорости внешней границы

$$v(z) = \frac{1}{\frac{1}{v_0} - \int_0^z f(r_1, r_2) dz}, \quad (3)$$

где $v_0 = Q/s_c$ - скорость на выходе тангенциально расположенного в точке $z=0$ входного сопла.

В реальном установившемся потоке роль радиальной и осевой составляющих незначительная в начале потока и возрастает по мере его продвижения в вихревой трубе при уменьшении разности $r_2 - r_1$. При принятых допущениях тангенциальная скорость вихревого потока определяется по выражению

$$v(z, r) = \frac{v_0}{1 - v_0 \int_0^z f(r_1, r_2) dz} \left(\frac{r_2}{r} \right)^n, \quad (4)$$

откуда образующие вихревой трубы $r_2(z), r_1(z)$ можно получить из решения вариационной задачи

$$v(z^*, r^*) = \max_{r_1, r_2} v(z, r), \{L > z > 0, r_2 > r > r_1\}, \quad (5)$$

где L - длина вихревой трубы.

Для более точной задачи можно вычислять критерий как интегральную скорость по линиям размещения вихреобразователей. Задача (5) решается численно при аппроксимации образующих r_2, r_1 кусочно-линейными функциями с помощью разработанной программы. Размещение вихреобразователей определяется в процессе численного эксперимента.

Максимальная мощность ультразвуковых колебаний кавитационной составляющей и вынужденных виброакустических колебаний конструктивов устройства достигается в вихревой трубе с образующими, полученными при решении вариационной задачи (5). Частотный спектр можно регулировать только за счет виброакустической составляющей. Спектр колебаний кавитационной составляющей зависит от физических параметров продукта. На рис. 3 представлен частотный спектр устройства, вихревые трубы которого изготовлены со следующими параметрами: $r_2(0) = 0,03$ м; $Q = 1,7$ м³/ч; $p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}} = 4$ атм; собственная частота резонатора стержня - 24 кГц. На рис. 3 и 4 ординаты нормированы максимальным значением амплитуды спектральной составляющей. Диапазон частоты 42-50 кГц соответствует спектру кавитационной составляющей для воды и не меняется в любом устройстве с гидродинамическим процессом. Большой интерес представляют колебания в диапазоне 20-25 кГц, где наблюдаются наибольшие физико-химические изменения продукта. Устройство можно применять в скважинах для депарафинизации НКТ, ликвидации АСПО на стенках НКТ. Для наземного нефтепромыслового оборудования возможно использование более мощных устройств акустической обработки продукта с гидродинамическим и газоструйным генераторами ультразвуковых колебаний (рис. 4). Акустическая мощность устройства 2 кВт рассчитана на рабочую частоту 19,5 кГц. Как видно из рис. 4, мощность газоструйной составляющей акустических колебаний на порядок превышает мощность кавитационной составляющей 42-50 кГц, реализованной путем теплообмена шести взаимодействующих вихрей [4]. С помощью газоструйного генератора может быть получена достаточная плотность акустического поля, необходимая для деструкции нефти в наземном нефтепро-

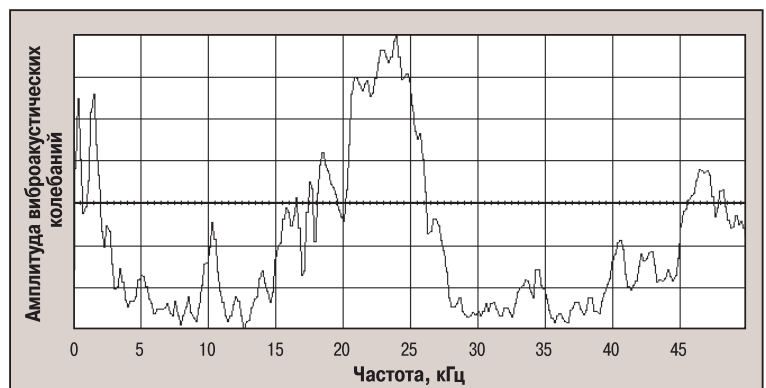


Рис. 3. Частотная характеристика депарафинизатора

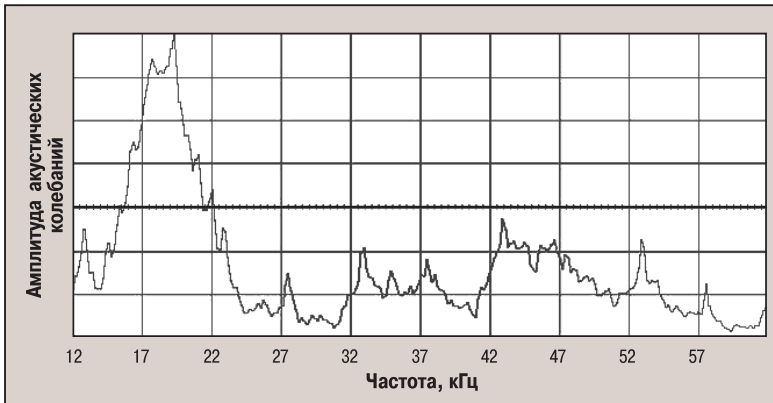


Рис. 4. Частотная характеристика устройства ($s_c=3,6 \text{ см}^2$, $p=4 \text{ атм}$) с вводом газообразного продукта, выполненного в виде газоструйного генератора акустических колебаний

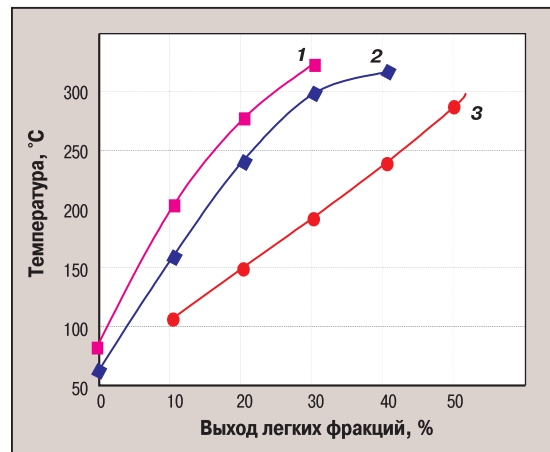


Рис. 5. График разгонки исходной нефти (1), нефти, обработанной кавитатором (2), и после применения ГУД для обработки в НКТ на глубине 3000 м (3)

мысловом оборудовании (например, подготовка нефти для транспорта по трубопроводам, предкрекингвая обработка).

Опытно-промышленные испытания депарафинизатора

Первые испытания опытных образцов ГУД в качестве устройства депарафинизации НКТ проведены в пилотных проектах путем акустического резонансного возбуждения вихревых потоков продукта при добыче нефти. В течение длительного периода работы скважины парафиноотложений не наблюдалось, без устройства в скважине выполнялась механическая очистка фрезой через 3-5 дней. Кроме того, фракционный состав нефти изменился в сторону увеличения выхода светлых фракций (рис. 5).

Первый цикл испытаний

Нефть: содержание парафинов – 4,28 %; силикагелевых смол – 7,87 %; асфальтенов – 1,28 %. Глубина скважины 3000 м, диаметр НКТ 62 мм, мощность двигателя 40 кВт, расход 40 м³/сут, период непрерывной работы 28 дней –отложений парафина не наблюдалось. Скважина была остановлена из-за недогрузки двигателя. После реверсивного включения двигателя и работы в течение 14 мин прокачка стала невозможной. Подъем НКТ показал, что около 20 м труб непосредственно за ультразвуковым реактором были заполнены АСПО, которые не позволяли прокачивать нефть, выше реактора отложений на стенках НКТ не наблюдалось.

Поскольку при указанном расходе скорость потока составляет 552 м/ч, при реверсивном включении было заполнено $552 \cdot 14 / 60 \approx 130$ м НКТ. При этом заполнение по объему АСПО составит около $(4,28 + 7,87 + 1,28) \cdot 130 / 100 = 17,459$ м НКТ, что достаточно хорошо согласуется с результатами осмотра поднятых

НКТ (20 м труб с АСПО). Следовательно, асфальтосмолопарафины примерно в полном объеме выделились в виде осадка в верхней части генератора при реверсе потока, значит реверсивное включение двигателя при применении ГУД недопустимо.

Второй цикл испытаний. Наблюдается безперебойная работы скважины в течение 40 дней. При контрольных проверках АСПО не замечено.

Таким образом, применение разработанного авторами устройства ГУД (по заявке на патент РФ № 2008102960(003232), приоритет от 25.01.08 г.) позволяет интенсифицировать тепломассообменный процесс потока нефти в НКТ, изменить дисперсно-агрегатное состояние нефти, депарафинизировать НКТ, увеличить выход легких фракций, что дает возможность перерабатывать нефть при меньших энергетических и трудовых затратах.

Список литературы

1. *Ультразвук: Маленькая энциклопедия.* – М.: Советская Энциклопедия, 1979. – 400 с.
2. *Патент РФ № 2232629. Способ интенсификации химических реакций.*
3. *Патент РФ № 93036942. Способ ультразвукового воздействия на среду с целью диспергирования частиц парафина в нефти.*
4. *Патент РФ № 2268772. Способ тепломассоэнергообмена и устройство его осуществления.*