

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ НЕФТИ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А.М. Пищухин, В.В. Тугов, Т.Б. Фахритдинов

Оренбургский государственный университет
460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13

Проведены исследования влияния ультразвукового воздействия на процесс сепарации нефти. Разработана математическая модель, описывающая процесс разделения нефтяной смеси с помощью ультразвукового воздействия.

Ключевые слова: нефть, математическая модель, ультразвук, сепарация, жидкостная и газовая фазы.

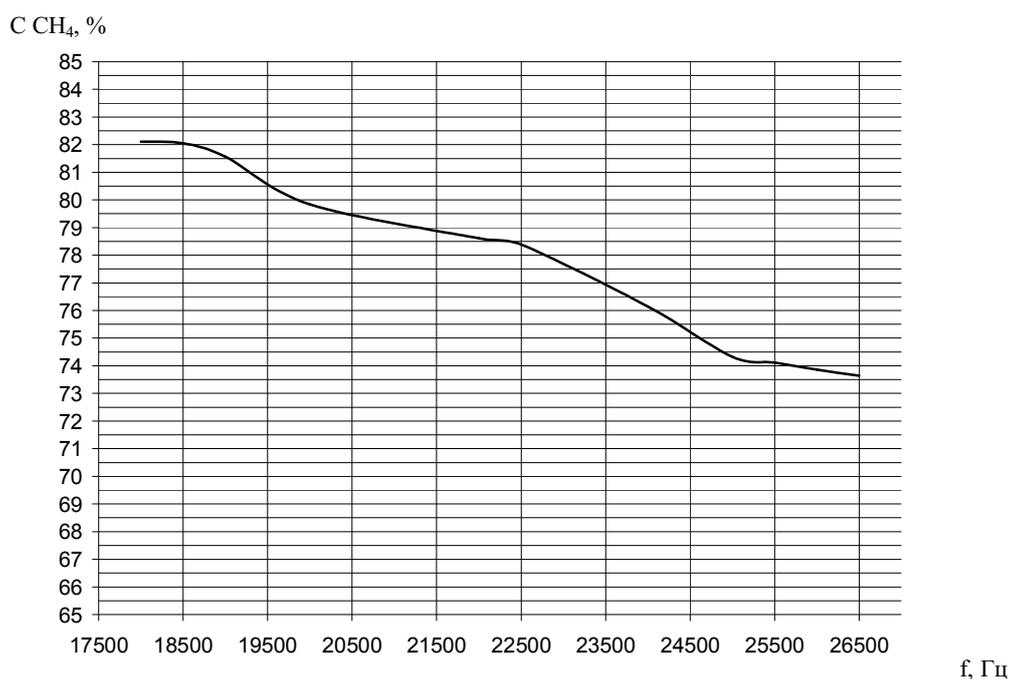
В условиях, когда себестоимость добычи нефти достаточно высока, а возможности капитальных вложений ограничены, углубление переработки нефти становится для страны первостепенной задачей. Глубокая переработка нефти дает возможность отрасли уверенно переносить изменения мировых цен на нефть. В этом отношении показателен опыт США: при глубине переработки 95% сырья покупка за рубежом сырой нефти позволяет бережно расходовать собственные сырьевые ресурсы. Развитие нефтяной промышленности в РФ связано с серьезными трудностями, обусловленными целым рядом свойственных ей специфических особенностей, таких как значительная рассредоточенность технологических объектов нефтяных промыслов, обводненность скважин, большое количество посторонних примесей в продукции нефтяных скважин и т. д. Все указанные обстоятельства значительно затрудняют эксплуатацию нефтяных месторождений и обслуживание технологических объектов нефтепромыслов. К тому же ограниченность запасов нефти и высокие темпы ее потребления вызывают необходимость вовлечения в разработку месторождений трудноизвлекаемых углеводородов – высоковязких нефтей и битумов. Очевидно, что такую «грязную» и сырую нефть, содержащую органические (от метана до бутана) и неорганические газовые компоненты, нельзя транспортировать и перерабатывать на НПЗ без тщательной ее подготовки. Однако известные в практике промысловой подготовки нефти способы являются малоэффективными.

Одним из перспективных способов эффективной промысловой подготовки нефти является сепарация с использованием акустического воздействия (ультразвука). Ультразвуковая обработка материалов получила широкое применение в других областях промышленности (металлургия, химическая промышленность). Применение данного способа позволяет интенсифицировать технологические процессы и получить в ряде случаев качественно новые показатели.

Для исследования влияния ультразвукового воздействия на процесс сепарации использовалась сырая нефть со скважин Маслиховского месторождения. Значение газового фактора составило 49-51 м³/т, содержание воды – 74,2% (объем.), содержание газов в нефти: СН₄ – 82,4%, С₃Н₈ – 3,48%. Исследуемая нефть обрабатывалась в экспериментальной установке в течение 5 мин при постоянном значении расхода 0,5 л/мин. После проведения эксперимента отбиралась проба и

*Александр Михайлович Пищухин. – д.т.н., профессор.
В.В. Тугов – к.т.н., доцент.
Тимур Борисович Фахритдинов – аспирант.*

проводился соответствующий анализ. Для каждого значения времени опыт проводился 3 раза, по полученным значениям вычислялось среднее значение соответствующих показателей. Графики зависимости содержания растворенного газа CH_4 и C_3H_8 в нефти от частоты ультразвуковой волны представлены на рис. 1 и 2 соответственно. По полученным экспериментальным данным видно, что применение ультразвука в процессе сепарации нефти позволяет снизить концентрацию растворенных газов, т. е. применение ультразвука в сепарационных установках позволит отказаться от некоторого числа ступеней сепарации. В свою очередь, отказ от некоторого числа ступеней (2-3) сепаратора за счет применения ультразвукового воздействия позволит снизить себестоимость перерабатываемой продукции.



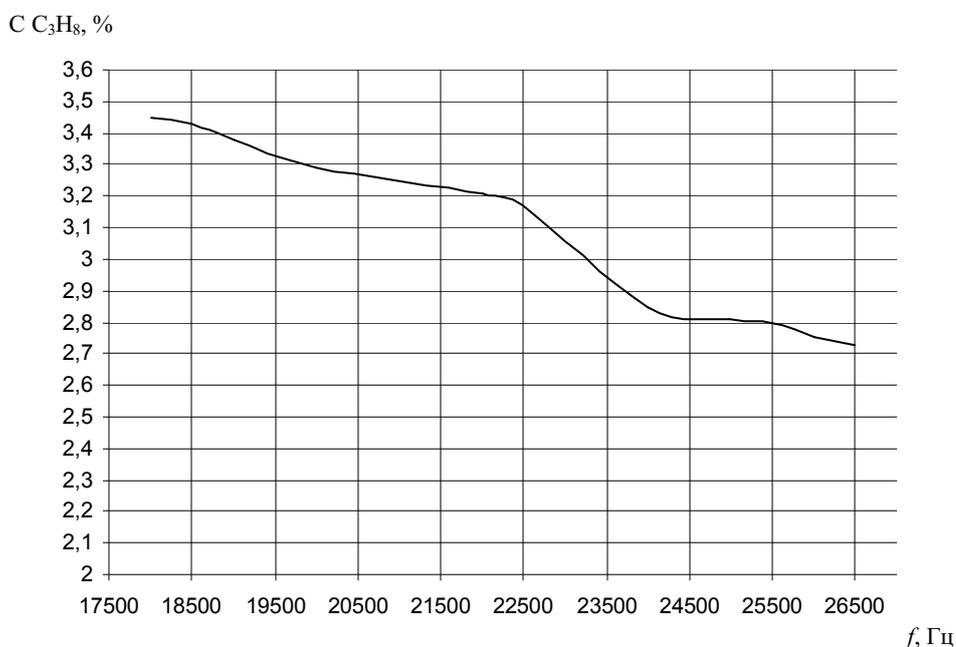
Р и с. 1. Зависимость содержания растворенного газа CH_4 в нефти от частоты ультразвуковой волны

Для идентификации полученных данных необходимо в первую очередь составить математическую модель парожидкостного состояния нефти.

При эксплуатации нефтяных месторождений массообменные процессы в добываемой нефти моделируются на основе фазового равновесия в многокомпонентных системах. Однако данное положение весьма условно, так как фазовое равновесие зависит от многих факторов – термобарических условий, длительности процесса, скорости диффузии компонентов, дисперсности и компонентного состава нефтяной смеси и т. д.

Результаты экспериментальных исследований, посвященных изучению проблем первичной подготовки нефти, весьма противоречивы. В части из них делаются выводы о существенном влиянии пород на свойства нефти и динамике содержания газовой фазы в процессе ее отбора [1]. Однако принципиальным моментом являлось то, что эти эксперименты проводились без учета содержания в нефти остаточной воды, которая в естественных породах составляет значительную часть. В связи с этим актуальными являются работы А.Ю. Намиота [2], в которых наиболее существ-

венные факторы, влияющие на фазовое состояние нефтяной смеси, проанализированы с позиций общих представлений физической химии о кинетике фазовых переходов. Согласно сказанному при различных термобарических условиях требуется рассчитывать парожидкостное равновесие в многокомпонентных системах.



Р и с. 2. Зависимость содержания растворенного газа C_3H_8 в нефти от частоты ультразвуковой волны

Процесс разделения нефти осуществляется в сепарационных установках (обычно многоступенчатых), распределенных согласно технологическому процессу. Несмотря на то, что технологический процесс происходит в конечном числе точек объекта, его можно рассматривать как непрерывный, поэтому для моделирования возможно применение дифференциальных уравнений в частных производных. Таким образом, представление процесса разделения нефти, осуществляемого на конечном числе устройств, в качестве непрерывного позволяет значительно упростить соответствующую математическую модель, то есть перейти от громоздкой системы обыкновенных дифференциальных уравнений к существенно меньшему числу уравнений в частных производных. При моделировании процесса нефть необходимо рассматривать как многокомпонентную смесь «жидкость 1 – жидкость 2 – пар». Под первым компонентом «жидкость 1» следует понимать собственно саму нефть, под вторым компонентом «жидкость 2» – воду и растворенные в ней соли, под компонентом «пар» – попутные газы.

Основу процесса разделения нефти составляют теплообмен, массообмен и гидродинамика взаимодействующих потоков. Этот процесс характеризуется большим числом параметров, связанных между собой сложными зависимостями. В промышленных условиях в большинстве случаев сепараторы работают в динамическом режиме, то есть со временем меняются состав и количество нефти. Кроме того, на сепараторы воздействует система управления с помощью различных параметров. Поэтому для исследования процессов сепарации необходима математическая модель, в основе которой лежит составление фазовых концентраций смеси.

Пусть нефть определенного состава Z_i разделилась на газовую фазу состава y_i и находящуюся с ней в равновесии жидкую фазу состава x_i . Мольная доля газовой фазы равна V , а жидкой фазы – L . Запишем уравнение материального баланса для i -того компонента смеси [3]:

$$z_i = y_i V + x_i L. \quad (1)$$

Поскольку $V + L = 1$, то заменим в уравнении (1) L на $(1-V)$. Кроме того, учтем, что коэффициент распределения i -того компонента нефти K_i равен $K_i = \frac{y_i}{x_i}$, и заменим y_i на произведение $K_i x_i$. Тогда из уравнения (1) получим:

$$x_i = \frac{z_i}{V(K_i - 1) + 1}, \quad (2)$$

$$y_i = \frac{z_i K_i}{V(K_i - 1) + 1}. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) называют уравнениями фазовых концентраций компонентов смеси. Они позволяют определить мольные доли компонентов в газовой и жидкой фазах нефти состава Z_i при заданных значениях коэффициентов распределения K_i и известном значении мольной доли паровой фазы V .

Поскольку $\sum_{i=1}^N x_i = 1$ и $\sum_{i=1}^N y_i = 1$, то $\sum_{i=1}^N (y_i - x_i) = 0$ и с учетом выражений (2) и (3) можно записать следующее уравнение для расчета мольной доли газовой фазы V смеси состава Z_i при заданных значениях K_i :

$$F(V) = \sum_{i=1}^N \frac{z_i(K_i - 1)}{V(K_i - 1) + 1} = 0. \quad (4)$$

Функция $F(V)$ является монотонно убывающей, так как

$$\frac{dF}{dV} = - \sum_{i=1}^N \frac{z_i(K_i - 1)^2}{(V(K_i - 1) + 1)^2} < 0. \quad (5)$$

Это свойство функции $F(V)$ используется при моделировании процесса разделения многокомпонентных систем.

Рассмотрим сферический газовый пузырек начального радиуса R_0 , помещенный в жидкость (в нашем случае нефтяная смесь). Будем предполагать, что центр пузырька не движется относительно смеси, объем же пузырька изменяется со временем за счет разности давлений внутри пузырька и в окружающей его смеси, а также в результате динамического и тепломассообменного взаимодействия между газовой и жидкой фазами. Считаем, что пузырек состоит из инертного газа i и паров смеси v . Смесь представляет собой бинарный раствор, который может испаряться с поверхности пузырька.

Запишем основные уравнения, характеризующие поведение многокомпонентной смеси.

В общем виде уравнение неразрывности выглядит следующим образом [4]:

$$\frac{D\rho_L}{Dt} + \rho_L \nabla u = 0, \quad (6)$$

где D/Dt – субстанциональная производная; ρ_L – плотность жидкости; ∇u – первый инвариант тензора скоростей деформации (если жидкость несжимаемая, то $\nabla u = 0$). Поскольку жидкость считается несжимаемой, то (6) сводится к следующему виду:

$$ur^2 = u_R R^2 = f(t), \quad (7)$$

где u , u_R – радиальная составляющая скорости в жидкости и на поверхности пузырька соответственно; R – радиус пузырька; r – радиальная координата (причем $r = 0$ соответствует центру пузырька).

Скорость движения жидкости u_R и скорость движения границы пузырька не равны, если на поверхности происходят фазовые превращения, так как они приводят к появлению потока массы:

$$\dot{m} = 4\pi R^2 \rho_L (\dot{R} - u_R), \quad (8)$$

где ρ_L – плотность жидкости; $\dot{R} = dR/dt$.

На основании выражения (8) опишем баланс массы газа в пузырьке:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_G \right) = 4\pi R^2 \rho_L (\dot{R} - u_R). \quad (9)$$

В процессе роста пузырька его объем изменяется, а плотность газа ρ_G практически не меняется. Поэтому, полагая в (9) $\rho_G = const$, получим:

$$u_R = \dot{R} \frac{(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L} = \varepsilon \dot{R}. \quad (10)$$

В случае для нефтяной смеси, как правило, выполняется неравенство $\rho_L \gg \rho_G$ и $\varepsilon \approx 1$. Следовательно $u_R \approx R$.

Подставляя (10) в (7), получим

$$ur^2 = \varepsilon \dot{R} R. \quad (11)$$

В общем виде уравнение движения выглядит следующим образом [4]:

$$\rho_L \frac{Du}{Dt} = -\nabla T + \rho_L f, \quad (12)$$

где T – тензор напряжений; f – объемные силы.

Поскольку в нашем случае отсутствуют объемные силы ($f = 0$), то уравнение (12) сводится к виду:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{\rho_L} \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} - 2\nu \frac{\partial^2 u}{\partial r^2}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (11) и интегрируя данное выражение по r от R до ∞ , получим:

$$\frac{\tau_{rr}(\infty) - \tau_{rr}(R)}{\varepsilon \rho_L} = R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 + 4\nu \frac{R}{R}. \quad (14)$$

Входящие в (14) радиальные составляющие тензора напряжений τ_{rr} равны:

$$\tau_{rr}(\infty) = -p_{\infty}, \quad (15)$$

$$\tau_{rr}(\infty) = -p_v - p_l + \frac{2\Sigma}{R}, \quad (16)$$

где p_{∞} – давление в жидкости вдали от пузырька; p_v , p_l – парциальное давление жидкости и газа; ν – кинематическая вязкость; Σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Условие (16) представляет собой баланс сил на границе пузырька, действующих со стороны газа и жидкости.

Подставив в (14) выражения (15) и (16), получим:

$$\frac{p_v + p_l - p_{\infty} - \frac{2\Sigma}{R}}{\varepsilon\rho_L} = R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + 4\nu\frac{R}{R}. \quad (17)$$

Уравнение (17) описывает изменение со временем радиуса пузырька за счет изменения разности давлений внутри и вне пузырька. Одним из эффективных способов изменения давлений является ультразвуковое воздействие на парожидкостную смесь.

Максимальный радиус пузырька, при котором он пульсирует, мало изменяя свои первоначальные размеры, называется резонансным радиусом, который определяется из следующего выражения [5]:

$$f = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{3n}{\rho_{\text{ж}} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R} \right)}}, \quad (18)$$

где f – частота ультразвукового поля; n – показатель политропы; σ – напряжение сдвига.

Из (18) следует, что резонансный радиус пузырька при воздействии акустического поля равен

$$R = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}, \quad (19)$$

$$\text{где } p = -\frac{3Pn}{4\pi^2\rho_{\text{ж}}f^2}; \quad q = -\frac{3\gamma\sigma}{2\pi^2\rho_{\text{ж}}f^2}.$$

Уравнения (17) и (19) показывают изменение со временем радиуса пузырька за счет изменения разности давлений внутри и вне пузырька и параметров звукового поля (в частности частоты ультразвукового поля). В свою очередь, изменение давления в пузырьке и около него вызывает эффект кавитации, приводящий к интенсивному выделению растворенных газов. Адекватность математического описания подтверждается на качественном уровне структурой уравнения (19), в котором размер пузырька пропорционален частоте ультразвукового воздействия, что объясняет увеличение выхода газа в описанном выше эксперименте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Требин, Ф.А.* Экспериментальное изучение влияния пористой среды на фазовые превращения газо-конденсатных систем / Ф.А. Требин, Г.И. Задора // Журнал «Нефть и газ», 1968, № 8.
2. *Намиот, А.Ю.* Фазовые равновесия в добыче нефти. - М.: Недра, 1976. – 284с.
3. *Брусиловский, А.И.* Фазовые превращения при разработке месторождении нефти и газа. - М.: Грааль, 2002. – 575 с.
4. Сепарация многофазных многокомпонентных смесей / Э.Г. Синайский, Е.Я. Лапига, Ю.В. Зайцев. – М.: Недра, 2002. – 621с.
5. *Шутилов, В.А.* Основы физики ультразвука. – Л.: Изд-во Ленингр.ун-ва, 1980. – 280с.

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2011 г.

UDC 665.6:621.928.1

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF OIL SEPARATION PROCESS UNDER ACOUSTIC INFLUENCE

A.M. Pishchukhin, V.V. Tugov, T.B. Fakhritdinov

Orenburg State University
13, Pobedi ave., Orenburg, 460018

The researches of ultra sound influence on the process of oil separation have been carried out. The mathematical model for description of oil blend separation by ultra sound influence has been elaborated.

Keywords: *oil, mathematical model, ultra sound, separation, liquid & gas phases.*

*A.M. Pishchukhin – Doctor of Technical Sciences, Professor.
V.V. Tugov – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.
T.B. Fakhritdinov – Postgraduate student.*