

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ НЕФТЯНОЙ СМЕСИ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В статье описывается поиск оптимального управляющего воздействия на нефтяную смесь в сепарационной установке первичной подготовки с использованием акустического воздействия (ультразвукового поля). Рассмотрено применение принципа максимума, который позволяет определить значения управляющих воздействий U на нефтяную смесь, оптимальные как по быстродействию, так и одновременно обеспечивающие наибольшую область устойчивости.

Ключевые слова: оптимальное управление, принцип максимума, критерий оптимальности управления, фазовая плоскость.

Введение. 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. Особенного внимания требуют малодобитные скважины в силу их многочисленности (до 70% от действующего фонда скважин). Например, в АНК «Башнефть» по состоянию на январь 2000 года в эксплуатации находились 12 540 малодобитных скважин, среднесуточная добыча которых не превышала 5 т нефтяной смеси в сутки. При общем количестве функционирующих скважин 15 469 указанный фонд малодобитных скважин составлял 81% [1]. Такая же тенденция роста количества малодобитных скважин прослеживается и в других нефтедобывающих странах. Так в США увеличение фонда нефтедобывающих скважин с 1975 года шло в основном за счет малодобитных механизированных скважин, часть которых ранее эксплуатировать было нерентабельно. И только за счет повышенных цен на нефть имеется возможность рентабельно эксплуатировать скважины с обводненностью до 99% [2]. Очевидно, что такую «грязную» и сырую нефть, содержащую к тому же легколетучие органические (от метана до бутана) и неорганические газовые компоненты, нельзя транспортировать и перерабатывать на НПЗ без тщательной ее промышленной подготовки. Присутствие пластовой воды в нефти существенно удорожает ее транспорти-

ровку по трубопроводам и переработку. С увеличением содержания воды в нефти возрастают энергозатраты на ее испарение и конденсацию. Возрастание транспортных расходов обуславливается не только перекачкой балластной воды, но и увеличением вязкости нефти, образующей с пластовой водой эмульсию. Так вязкость нефти с увеличением содержания в ней воды от 5 до 20% в среднем возрастает почти вдвое. Ограниченность запасов нефти и высокие темпы ее потребления вызывают необходимость вовлечения в разработку месторождений трудноизвлекаемых углеводородов – высоковязких нефтей, битумов, газогидратов. Их переработка известными в практике нефтегазодобычи способами является малоэффективной.

В связи с этим применение ультразвукового воздействия при первичной переработке продукции скважин приобретает особое значение, т. к. позволяет обеспечить более эффективные выходные показатели продукции при промышленной подготовке нефти.

Постановка задачи. Теоретические, лабораторные и промышленные исследования, проведенные в последние годы как в нашей стране, так и за рубежом, показали возможность применения ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для ускорения процесса разделения нефтегазовой смеси. Это обусловлено возникновением в ней кавитационного процесса. Ультразвуковой аппарат, предназначенный для интенсификации технологических процессов, должен иметь достаточный запас мощности для реализации режима развитой кавитации, а также достаточный диапазон перестройки рабочей частоты электронного генератора системой автоматической подстройки частоты. На выбор этих параметров влияют как свойства обрабатывае-

мой нефти, так и параметры ультразвуковых колебательных систем [3].

Система управления процессом сепарации нефти может находиться в одном из следующих режимов:

- в нормальном оптимальном; при этом значения всех параметров режима (расход нефтяной смеси через сепарационную установку, напряжение и частота акустического излучателя) находятся в пределах, допустимых для длительной работы при требуемом значении показателей на выходе установки и надежности, нагрузки на оборудовании в таком режиме соответствуют оптимальным с точки зрения экономичности;

- в нормальном неоптимальном; отличается от нормального оптимального тем, что нагрузка на установку не соответствует оптимальным с точки зрения экономичности;

- в утяжеленном (ухудшенном); при этом значения отдельных параметров отличаются от длительно допустимых и могут быть в течение короткого времени до восстановления нормального режима;

- в аварийном, при этом отдельные параметры режима достигают значений, существование которых допустимо лишь кратковременно (доли секунд или секунды) вследствие опасности повреждения сепарационной установки (аварийное увеличение выходной частоты излучателя и напряжения).

В зависимости от режима работы оборудования будет отличаться и задача управления сепарационной установкой, которая заключается в определении управляющего воздействия на нефтяную смесь, оптимального по быстродействию при наибольшей области устойчивости.

Решение поставленной задачи. Общей целью управления процессом сепарации является акустическое воздействие на некоторый объем нефтяной смеси при наименьших затратах. В качестве фазовых координат, характеризующих процесс сепарации с помощью акустического воздействия, могут рассматриваться различные показатели, такие как: частота акустического воздействия $\omega(t)$, площадь излучателя S , интенсивность излучения $I(t)$, мощность излучения $N(t)$ и т. д.

Критерием оптимальности процесса сепарации является функционал Q , зависящий от какой-либо одной, нескольких или, в общем слу-

чае, всех вышеперечисленных фазовых координат процесса:

$$Q = Q[\omega(t), S, I(t), N(t) \dots]. \quad (1)$$

Для выбора критериев оптимальности следует предварительно оценить вид возмущения и ряд ограничений (по напряжению, частоте, и т. п.). При ультразвуковом воздействии на нефтяную смесь для получения режима развитой кавитации частота излучателя ω_{ij} не должна превышать некоторого критического значения $\omega_{ij\text{крит}}$. Следовательно, при любом приемлемом управляющем воздействии U на координаты системы ω_{ij} должны быть наложены ограничения вида [4]:

$$\omega_{ij}(U) \leq \omega_{ij\text{крит}}(U), \quad (2)$$

где $i, j = 1, 2, \dots; i \neq j$.

Невыполнение условия (2) будет означать нарушение динамической устойчивости. Поэтому для получения наибольшей области устойчивости оптимальное управление должно обеспечивать минимальное отклонение частоты излучателя от значений в установившемся послеаварийном режиме. Это требование можно записать как:

$$|\Delta\omega_{\text{макс}}(U_{\text{опт}})| \leq |\Delta\omega_{\text{макс}}(U)| \in F|\Delta\omega(U)|, \quad (3)$$

где F – область допустимых отклонений частоты излучателя.

Критерий вида (3) справедлив также и для остальных параметров системы управления: напряжения, мощности и т. д.

Однако процесс сепарации нефти является многосвязной системой со многими независимыми переменными, и поэтому ставить задачу достижения экстремума для двух и более функционалов одновременно нельзя, так как экстремумы у различных функционалов не соответствуют в общем случае одной и той же совокупности значений аргументов. Для решения данной проблемы необходимо формирование единого критерия оптимальности.

Обобщенный критерий оптимальности управления в таком случае запишется в виде [5]:

$$I_V^\Sigma = \sum_{s=1}^n k_s P_{ks}(U_{\text{опт}}) = \min, \quad (4)$$

где k_s – весовой коэффициент;

$P_{ks}(U_{\text{опт}})$ – обобщенный показатель качества переходного процесса.

Процессы, существенные для определения границ допустимой области нормального режима, могут быть описаны системой нелинейных

обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами [5]:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = F(X, U) \\ \frac{dU}{dt} = \Phi(X, U) \end{cases} \quad (5)$$

где $X = X(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ – вектор параметров режима;

$U = U(u_1, u_2, \dots, u_k, t)$ – вектор управляющих воздействий.

Пусть X_0 – вектор начальных значений координат системы (при $t = 0$), а $X_{уст.}$ – вектор значений координат, отвечающих установившемуся движению. Компоненты $X_{уст.}$ являются корнями уравнений [5]:

$$F(X, U) = 0, \quad (6)$$

$$\Phi(X, U) = 0. \quad (7)$$

Уравнения установившегося режима сепарационной установки (6)-(7), полученные из (5), являются нелинейными уравнениями.

Возмущение в момент времени $t = 0$ характеризуется вектором [5]:

$$\Delta X_0 = X_0 - X_{уст.} \quad (8)$$

Возмущения могут быть вызваны изменением как координат, так и параметров системы. При этом в общем случае изменяется положение равновесия системы по сравнению с положением равновесия до момента возмущения. Система управляема при заданном начальном режиме X_0 и заданном возмущении ΔX_0 , если при использовании управления U ее можно перевести в состояние $X_{уст.}$ за допустимый отрезок времени.

Для нахождения оптимального управления применим принцип максимума, при котором на определение экстремума функции наложены некоторые ограничения. При данном подходе введем ограничения на управляющие воздействия:

$$|U_j| \leq 1. \quad (9)$$

Поведение системы управления описывается как [4]:

$$\begin{cases} dx_1/dt = f_1(x_1, \dots, x_n; U_1, \dots, U_k); \\ \dots \\ dx_n/dt = f_n(x_1, \dots, x_n; U_1, \dots, U_k) \end{cases} \quad (10)$$

где x_i – координаты объекта;

U_j – управляющее воздействие.

Большое значение в принципе максимума

имеют вспомогательные переменные $\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_n$ и промежуточная функция – гамильтоннан, по его виду можно найти функции при которых он достигает максимума:

$$H = \sum_{i=0}^n \psi_i f_i(x_1, \dots, x_n; U_1, \dots, U_k). \quad (11)$$

С помощью этой функции (11) основная система уравнений, описывающее управление (10), и уравнения, необходимые для определения вспомогательных переменных $\psi_i(t)$ запишутся в виде [4]:

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \psi_i}, \quad (12)$$

$$\frac{d\psi_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_i}. \quad (13)$$

Так как $\partial H / \partial \psi_i = f_i$, то уравнение (12) эквивалентно уравнению (10). Основным условием, при котором управление $U_j(t)$ должно быть оптимальным, является достижение максимума функции H , если $U_j(t)$ – оптимальное управление [6]:

$$H(\psi_i; f_i; U_j = U_{j\text{ опт}}) = M(\psi_i; f_i), \quad (14)$$

где M – максимальное значение.

Кроме того, в конечный момент времени $t = T$ выполняются условия [6]:

$$\psi_0(T) \leq 0, \quad (15)$$

$$M(\psi_i(T); f_i(T)) = 0. \quad (16)$$

При решении задачи максимального быстрого действия функционалом будет являться время [6]:

$$J = \int_0^T f_0(x_i; U_j) dt = \int_0^T dt. \quad (17)$$

В таком случае переменная ψ_0 отпадает и функция H принимает вид [6]:

$$H = \sum_{i=1}^n \psi_i f_i(x_1, \dots, x_n; U_1, \dots, U_k). \quad (18)$$

При акустическом воздействии на процесс подготовки нефтяной смеси оптимальное управление будет происходить по границе допустимой области ограничений. Применение принципа максимума дает возможность установить структуру оптимального управления $U(t)$ и осуществить синтез оптимальной системы.

Поведение системы управления описывается как:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2, \quad (19)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = U. \quad (20)$$

Ограничением будет являться условие (9).
В таком случае функция H примет вид:

$$H = \psi_1 x_2 + \psi_2 U. \quad (21)$$

Для $|U_j| \leq 1$ максимум H будет достигаться при $U = \text{sign } \psi_2$, т. е. $U(t) = +1$ при $\psi_2 > 0$ и $U(t) = -1$ при $\psi_2 < 0$. Вспомогательные переменные ψ_i определим из системы уравнений:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x_1} = 0. \quad (22)$$

$$\frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_2} = -\psi_1. \quad (23)$$

Из уравнений (22) и (23) получим:

$$\psi_1 = c_1, \quad (24)$$

$$\psi_2 = c_2 - c_1 t. \quad (25)$$

Решением системы (19) и (20) при управлении $U = +1$ будет являться:

$$x_1 = 0,5x_2^2 + C. \quad (26)$$

На фазовой плоскости это изобразится семейством парабол, показанных на рисунке 1.

При управлении $U = -1$ система уравнений (19) и (20) имеет решение в виде:

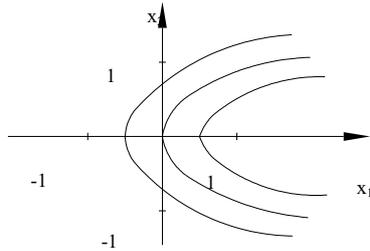


Рисунок 1. Семейство парабол при управлении $U = +1$

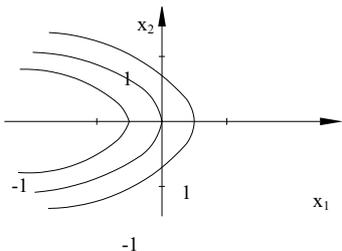


Рисунок 2. Семейство парабол при управлении $U = -1$

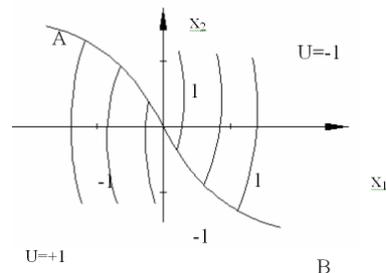


Рисунок 3. Семейство парабол при переходе системы от значения $U = +1$ к значению $U = -1$ и обратно

$$x_1 = -0,5x_2^2 + C. \quad (27)$$

В таком случае семейство парабол будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

При переходе от значения $U = +1$ к значению $U = -1$ или обратно поведение системы будет характеризоваться системой парабол, изображенных на рисунке 3.

Опишем оптимальное управляющее воздействие на нефтяную смесь. Оптимальная система должна обеспечивать на выходе сигнал $U = +1$, если x_1 и x_2 таковы, что точка, изображающая поведение системы, находится ниже линии переключения АВ (см. рис. 3) и наоборот. При внешних воздействиях система изменяет свои координаты x_1 и x_2 ; при попадании точки на кривую АВ сигнал на выходе переключается от значения $U = +1$ к значению $U = -1$ и наоборот. Таким образом, система будет являться оптимальной при следующих условиях:

$$U = +1 \text{ при } x_1 < 0; x_2 < 0; \quad (28)$$

$$U = -1 \text{ при } x_1 > 0; x_2 > 0. \quad (29)$$

В обобщенном виде переменные (выход растворенных газов, содержание воды, расход нефти и т. д.) можно представить в качестве компонент вектора X , а компонентой вектора U примем напряжение, подаваемое на генератор ультразвуковых колебаний, или частоту ультразвуковой волны. Тогда состояние системы описывается как:

$$\frac{dX}{dt} = f(X; U). \quad (30)$$

В установившемся режиме производные всех переменных равны нулю. При управлении величина напряжения (или частоты) ограничивается диапазоном:

$$-U_{f \text{ макс}} \leq U_f \leq +U_{f \text{ макс}}. \quad (31)$$

Примем за единицу напряжения $U_{f \text{ макс}}$:

$$|U_f| \leq 1. \quad (32)$$

В ходе исследований были проведены эксперименты в лабораторных условиях. Для исследования влияния ультразвукового воздействия на процесс сепарации использовалась сырая нефть со скважин Маслиховского месторождения. Значение газового фактора составляет 49–51 м³/т. Давление на глубине 1856 метров составило 94,6 кгс/см², температура – +27,8°С. Давление на устье составило 56,0 кгс/см². Содержание воды составляет 74,2% (объем.),

содержание газов (молярная доля) в нефти: CH_4 – 82,4%, C_3H_8 – 3,48%.

Исследуемая нефть обрабатывалась в экспериментальной установке в течение 5 мин. при постоянном значении расхода 0,5 л/мин. При исследовании влияния какого-либо управляемого параметра на показатели нефти, остальные значения управляемых параметров устанавливались в максимально допустимом значении. Например, если исследовалось влияние частоты ультразвуковой волны, то выходное напряжение устанавливалось максимально допустимым значением. После проведения эксперимента отбиралась проба и проводился соответствующий анализ, результат которого представлен на рисунке 4 на примере выхода из нефти метана.

Из графика зависимости содержания растворенного газа CH_4 в нефти от частоты ультразвуковой волны видно, что с увеличением частоты вибратора происходит снижение концентрации растворенного метана в нефти, однако дальнейшее увеличение частоты (свыше 25 кГц) не приводит к существенному снижению концентрации.

Выводы. Таким образом, применение принципа максимума позволяет определить

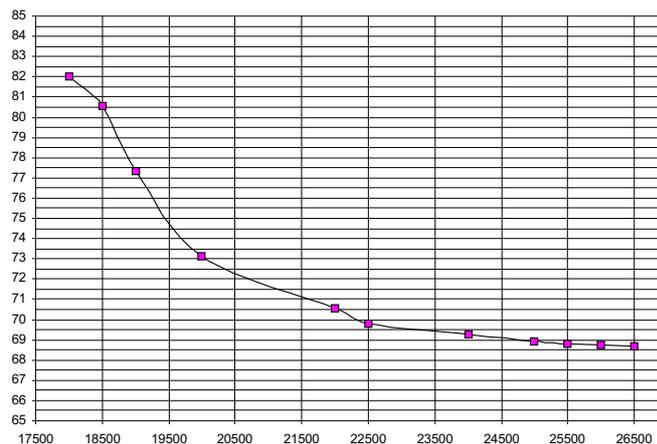


Рисунок 4. Зависимость содержания растворенного газа CH_4 в нефти от частоты ультразвуковой волны

значения управления U при акустическом воздействии на нефтяную смесь, оптимальные по быстродействию и одновременно обеспечивающие наибольшую область устойчивости. Оптимальная функция U должна приводить к максимуму гамильтониана H , составленного по уравнению (11). Ограничение (31) позволяет достигнуть максимума H при чередовании максимальной форсировки напряжения $U_f = +1$ с максимальной форсировкой обратного знака напряжения $U_f = -1$.

25.11.2010 г.

Список использованной литературы:

1. Касимов Л.Н. Регулируемый экономичный электропривод для станков-качалок малодобитных скважин / Л.Н. Касимов, Е.С. Шаньгин // Электротехника, 1999, №8.
2. Брагинский О.Б. Мировая нефтехимическая промышленность / О.Б. Брагинский. – М.: Наука, 2003. – 556 с.
3. Цыганок С.Н. Полуволновые пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы / С.Н. Цыганок, В.Н. Хмельев, Р.В. Барсуков, А.Н. Лебедев // Техническая акустика, 2005, №22.
4. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
5. Веников В.А. Управление переходными режимами электроэнергетических систем / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1982. – 247 с.
6. Дубовицкий А.Я. Необходимые условия слабого экстремума в общей задаче оптимального управления / А.Я. Дубовицкий. – М.: Наука, 1971. – 115 с.

Сведения об авторах: **Тарасов Вениамин Николаевич**, заведующий кафедрой программного обеспечения и управления в технических системах Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, доктор технических наук, профессор, e-mail: vt@ist.psati.ru

Тугов Виталий Валерьевич, заведующий кафедрой системного анализа и управления Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент.

460018, г.Оренбург, пр.Победы, 13, ауд.14107, тел.(3532) 37-25-57, E-mail: sau@unpk.osu.ru

Фахритдинов Тимур Борисович, аспирант кафедры систем автоматизации производств Оренбургского государственного университета.

460018, г.Оренбург, пр.Победы, 13, ауд.2125, E-mail: tim2121@yandex.ru

UDC 681.5

Tugov V.V., Tarasov V.N., Fakhritdinov T.B.

OPTIMAL MANAGEMENT OF PREPARATION OF OIL BLENDS BY ACOUSTIC EFFECTS

The article describes the search for the optimal control impact on the oil mixture placed inside the separation unit for initial preparation with the aid of acoustic effects (ultrasonic field).

The application of the maximum principle is considered, which allows determine the U controls on oil mixture, being the best in speed, and simultaneously providing the greatest stability.

Keywords: optimal control, maximum principle, the criterion for optimal control.