

УДК 519.81

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ХАОСА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

Э. М. Шахвердиев¹, Л. А. Шелепин

Рассмотрена возможность описания процессов добычи нефти на основе модели Лоренца и ее взаимосвязи с теорией стохастического резонанса. Показано, что синхронизация хаотических колебаний в динамических системах может быть использована для оптимизации нефтеотдачи.

Известно, что модель Лоренца является классическим примером детерминированного хаоса [1, 2]. В настоящее время установлено, что эта модель или ее модификации могут быть адекватными в физике атмосферных явлений, гидродинамике, магнетизме, теории сверхпроводимости, электронике (см., напр., [1 – 11] и ссылки в них). Как отмечено в [12, 13], модификации этой модели могут быть использованы для моделирования процессов добычи нефти. Следуя [12, 13], запишем модифицированную модель в виде

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x), \quad \frac{dy}{dt} = \rho x - y - \alpha xz, \quad \frac{dz}{dt} = -\beta z + \gamma xy. \quad (1)$$

Динамические переменные x , y , z соответствуют дебиту воды x , закачке воды y , дебиту нефти z . При $\gamma = 1$, $\alpha = 1$ система (1) переходит в классическую модель Лоренца. Как показывают расчеты, условие развития хаоса в системе (1) совпадает с аналогичным условием для классической модели Лоренца [4].

Отметим, что вывод работ [12, 13] об адекватности модифицированной модели Лоренца в процессах нефтеотдачи базируется, в частности, на результатах восстановления динамической системы по данным x , y , z .

¹Институт физики АН Азербайджана (г. Баку).

Так как поведение хаотической системы непредсказуемо, то траектории двух хаотических систем с очень близкими начальными условиями со временем быстро становятся некоррелированными, т.е., казалось бы, попытки обуздания хаоса обречены на провал. Однако интенсивные исследования этой проблемы дали положительный результат. Синхронизация хаотических колебаний является одним из способов контроля хаоса [5 – 9, 11, 14]. В основе принципа взаимного согласования движений хаотических систем (синхронизации хаотических колебаний) лежит идея связывания этих систем с помощью общего ведущего сигнала (драйвера). Результаты исследований синхронизации хаотических колебаний находят применения в задачах скрытой связи, при решении космических проблем, при моделировании процессов распознавания, для оптимизации функциональных характеристик сложных систем и т.п. [5 – 9, 11, 14].

В настоящей работе рассматривается принципиальная возможность применения синхронизации хаоса для увеличения добычи нефти. Такая возможность обусловлена следующими соображениями: известно, что траектории хаотического поведения динамической системы, как правило, состоят из неустойчивых периодических орбит, и функциональные показатели системы на этих траекториях различаются. С помощью внешних незначительных возмущений систему можно заставить перейти на "нужную" орбиту; другими словами, поведением системы можно управлять.

Для исследования синхронизации хаоса в системе (1) будем следовать методу, описанному в [14], и рассмотрим случай реализации режима синхронизации, требующего знания минимума информации о системе. Анализ системы (1) показывает, что такой случай, в частности, реализуем, если в качестве драйвера принять динамическую переменную x . Согласно теории [14], эволюция системы двух других динамических переменных (репличная система) будет синхронизована с эволюцией исходной системы, если удовлетворяется условие отрицательности показателей Ляпунова для репличной системы. Как показывают расчеты, вышесказанное имеет место, если удовлетворяются условия положительности величин $1 + \beta$ и $\gamma\alpha$.

Рассматривая в качестве драйвера переменную y , находим, что синхронизация хаоса реализуется при положительности β и σ ; другими словами, в этом случае можно реализовать синхронизационный режим, так как в физических задачах β и σ всегда положительны.

При практической реализации метода может быть использована взаимосвязь (1) с теорией стохастического резонанса [15 – 17]. Имеется два стационарных решения (1).

Одно тривиальное $x = y = z = 0$, другое $x = y = \pm \sqrt{\frac{\beta - (p-1)}{\alpha\gamma}}$ следует из соотношений

$$x(p-1 - \alpha z) = 0, \quad \beta z = \gamma x^2.$$

В случае $\beta, \sigma \gg 1$ можно рассматривать алгебраические уравнения для x и z , являющихся быстрыми переменными

$$\sigma(y-x) = 0 \Rightarrow y = x; \quad -\beta z + \gamma xy = 0 \Rightarrow z = \gamma y^2 / \beta.$$

Для медленной переменной y справедливо уравнение

$$\frac{dy}{dt} = (p-1)y - \alpha \frac{\gamma}{\beta} y^3 = ay - by^3 = U'(y).$$

Здесь мы имеем бистабильную систему с потенциальной функцией

$$U(y) = -\frac{a}{2}y^2 + \frac{b}{4}y^4$$

положение минимумов, которой определяемых значениями x

$$\pm \sqrt{\frac{a}{b}} = \pm \sqrt{\frac{\beta(p-1)}{\alpha\gamma}}.$$

При учете шума $\xi(t)$ (в рассматриваемом случае это флуктуации давления) можно записать уравнение Ланжевена

$$\frac{dy}{dt} = -U'(y) + \xi(t). \quad (2)$$

Для белого шума анализ может проводиться на основе уравнения Фоккера - Планка. Если добавить периодическую силу в правую часть (2), то для низких частот $\omega \leq \mu_1$ (μ_1 - частота Крамерса) может реализовываться эффект стохастического резонанса [15 - 17], что открывает возможности воздействия на нефтеотдачу.

Предложенное в настоящей работе использование явления синхронизации хаоса для увеличения нефтеотдачи представляется перспективным.

Авторы выражают благодарность академику АН Азербайджана проф. Мирзаджанзаде А. Х. за постановку задачи и многочисленные обсуждения, а также Решетняку С. А. за стимулирующие дискуссии.

Работа частично поддержана РФФИ (грант 96-02-18692).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Хакен Г. Синергетика, М., Мир, 1980.
- [2] Хакен Г. Лазерная светодинамика, М., Мир, 1988.
- [3] Ораевский А. Н. ЖЭТФ, **103**, в. 3, 981 (1993).
- [4] Шустер Г. Детерминированный хаос. М., Мир, 1988.
- [5] Ott E., Grebogi C., Yorke J. A. Phys. Rev. Lett., **64**, N 11, 1196 (1990).
- [6] Pecora L. M., Carroll T. L. Phys. Rev. Lett., **64**, N 8, 821 (1990).
- [7] Gupte N., Amritkar R. E. Phys. Rev. E, **48**, N 3, 1620 (1993).
- [8] Murali K., Lakshmanan M. Phys. Rev. E, **48**, N 3, 1624 (1993).
- [9] Shinbrot T. Advances in Physics, **44**, N 2, 73 (1995).
- [10] Мирзоев Ф. Х., Панченко В. Я., Шелепин Л. А. УФН, **166**, N 1, 3 (1996).
- [11] Ott E., Spano M. Physics Today, May 1995, p. 34.
- [12] Мирзаджанзаде А. Х. Аттрактор Лоренца и проблемы прогнозирования нефтеотдачи пластов. Неопубликованное сообщение (1996).
- [13] Мирзаджанзаде А. Х., Султанов Ч. А. Диакоптика процессов нефтеотдачи пластов. Баку, 1995.
- [14] Ding M., Ott E. Phys. Rev. E, **49**, N 2, 945 (1994).
- [15] Решетняк С. А., Шелепин Л. А. Квазиравновесные распределения в кинетике. М., ИПО Автор, 1996.
- [16] Решетняк С. А., Щеглов В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 11-12, 37 (1993).
- [17] Решетняк С. А., Щеглов В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 11-12, 43 (1993).

Поступила в редакцию 7 июля 1997 г.