

О ВОЗМОЖНОСТЯХ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Построение количественных моделей сложных систем, состоящих из нескольких подсистем, требует учета кооперативных (коллективных) эффектов, которые не описываются традиционными подходами. Для описания кооперативных явлений в настоящее время развивается новое направление в физико-математических методах, которое называется **синергетикой**. Синергетика по своей сути является теорией самоорганизации. Под самоорганизацией в физике открытых систем понимают установление в диссипативной неравновесной среде пространственных структур, эволюционирующих во времени, которые принято называть **диссипативными структурами**.

Фактически, любой реальный процесс при значительном отклонении от состояния равновесия протекает с эффектами самоорганизации, которые играют ключевую роль в особенностях реализации этих процессов. Теория самоорганизации, относящаяся к физике открытых систем, находится в стадии развития. Начальные физические принципы этой теории развиты в работах И. Пригожина [1983 и др.], а математические подходы и сам термин «синергетика» даны в работах Г. Хакена [1985 и др.].

При рассмотрении конкретных реальных кооперативных систем нет готовых рецептов, поэтому моделирование таких систем является нетривиальной задачей. Рассмотренный вариант моделирования объединенной системы (пласт + источник внешнего воздействия) с позиций синергетики позволяет выделить основные факторы исследуемого процесса и наметить основные направления по оптимизации фильтрационного параметра. **Данный подход является оригинальным и не имеет аналогов в мировой практике** (для рассматриваемого случая).

Основные следствия, вытекающие из рассмотренного моделирования:

1. Необходимость учета собственной энергонасыщенности продуктивного пласта для создания условий, приближающихся к случаю «отрицательной диссипации» (наряду с компенсацией затухания для внешней силы, осуществляется подпитка дополнительной энергией).

2. Небольшие амплитуды внешнего силового воздействия.

3. Преобладающая зависимость поведения объединенной системы от параметров продуктивного пласта и слабая зависимость от структуры источника внешнего воздействия, от начальных условий и, как правило, от граничных условий.

4. **Нелинейный характер поведения** рассматриваемой системы, даже при незначительных внеш-

них воздействиях, что обуславливает жесткие требования к выбору доминантных частот виброволнового воздействия (для приближения к резонансным условиям).

5. Для выбора оптимальных технологических параметров виброволнового воздействия на продуктивный пласт необходима автоматическая система регулирования режимов воздействия за счет отрицательной обратной связи с пластом (учет отклика на внешнее воздействие).

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ: ПЛАСТ + ИСТОЧНИК ВОЗДЕЙСТВИЯ

Для построения физической модели составной системы, состоящей из продуктивного пласта и источника виброволнового воздействия, необходимо использовать подходы теории самоорганизации. Исходя из этой теории, рассматриваемую систему математически можно описать двумя дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{F}_e = -\gamma_1 F_e - \alpha F_e X \\ \dot{X} = -\gamma_2 X + \beta F_e^2 \end{cases} \quad (1), (2)$$

где точка над F_e и X обозначает производную по времени.

Уравнение (1) описывает воздействие виброисточников (внешней упругой силы F_e) на рассматриваемую объединенную систему X (для описания самоорганизации в этой системе F_e рассматривается как часть системы X , то есть является переменной, подчиняющейся уравнениям (1) и (2)).

Интенсивность воздействия описывается членом $\gamma_1 F_e$, где γ_1 — коэффициент затухания силы; **поглощение этой силы** в результате взаимодействия с системой X характеризуется членом $-\alpha F_e X$, где α — амплитудное значение силы.

Уравнение (2) описывает **внутренние перестройки системы X** через произведение $-\gamma_2 X$, (где γ_2 — коэффициент затухания в системе X при отсутствии взаимодействия с F_e) и **перестройки в системе X** под влиянием воздействия F_e с помощью слагаемого βF_e^2 , где β — **константа взаимодействия**, которая определяется экспериментально).

При анализе математических свойств системы уравнений (1) и (2) конкретный физический смысл отдельных членов пока не имеет значения. При выполнении условия, что γ_1 малая величина и α , F_e с X также сравнительно малы, в первом приближении можно пренебречь квадратичным членом $-\alpha F_e X$, тогда получаем малое изменение величины F_e . В результате из уравнения (2) видно, что основные изменения (перестройка) в системе X обусловлены

членом βF_g^2 . При этом в силу небольших изменений F_g следует ожидать **медленное изменение X** , то есть $X \approx 0$. Тогда при условии $\gamma_2 \gg \gamma_1$ (**адиабатическое приближение**, когда величина F_g изменяется достаточно медленно по сравнению с изменением, обусловленным значением γ_2 , то есть $|\dot{F}|_{\max} \ll \gamma_2 |F_g|$). Это позволяет при $\gamma_2 > 0$ выразить поведение системы X через F_g :

$$X = \frac{\beta \cdot F_g^2}{\gamma_2} \quad (3)$$

Выражение (3) представляет собой количественную запись одного из основных положений теории самоорганизации («принципа подчинения») для рассматриваемого случая, когда переменная X подчинена переменной F_g . Подчинение переменной F_g большого числа переменных сильно упрощает сложную систему, и переменная F_g в таких случаях играет роль **параметра порядка**.

При подстановке решения (3) в уравнение (1) получим:

$$\dot{F}_g = -\gamma_1 F_g - \frac{\alpha \cdot \beta}{\gamma_2} \cdot F_g^3 \quad (4)$$

Решения уравнения (4) при $\gamma_1 > 0$ и $\gamma_1 < 0$ совершенно различны.

При $\gamma_1 > 0$ (**затухающая сила**) получаем $F_g \rightarrow 0$, а значит и $X \rightarrow 0$, то есть действие F_g на X пренебрежимо мало.

При $\gamma_1 < 0$ (случай «отрицательной диссипации», когда наряду с отсутствием затухания осуществляется подпитка дополнительной энергией) стационарное решение имеет вид:

$$F_g = \pm \left(\frac{|\gamma_1| \cdot \gamma_2}{\alpha \cdot \beta} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Из решения (5) видно, что $F_g \neq 0$, то есть имеется воздействие на систему X . При подстановке (5) в (3) получаем следующее общее поведение системы X :

$$X \approx \frac{|\gamma_1|}{\alpha} \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что при $\gamma_1 < 0$ и малой амплитуде внешних воздействий продуктивный пласт может быть подвержен устойчивым воздействиям. При этом подход с позиций «принципа подчинения» согласуется с наблюдаемым

проявлением самоорганизации в реальных средах. Как известно, под самоорганизацией понимают установление в диссипативной неравновесной среде пространственных структур, эволюционирующих во времени (**«диссипативных структур»**), параметры которых определяются **свойствами самой среды** и слабо зависят от структуры источника воздействия, от начального состояния среды и, обычно, от граничных условий.

Реальность намного сложнее ситуации, описываемой уравнениями (1) и (2). Коэффициенты этих уравнений могут зависеть от времени и содержать флуктуирующие силы, поэтому необходима **автоматическая система коррекции этих факторов**.

Таким образом, важным выводом, следующим из «принципа подчинения», является преобладающая зависимость поведения системы X при структурных перестройках, от параметров среды и продуктивности пласта.

В адиабатическом приближении при $\gamma_1 \approx 0$ выражение (3) можно представить в виде следующего разложения:

$$X(t) = \frac{\beta}{\gamma_2} F_g^2 + \frac{2\beta}{\gamma_2^3} F_g^4 + \frac{8\beta}{\gamma_2^5} F_g^6 + \dots \quad (7),$$

которое получается, если проинтегрировать уравнение (2) в квадратурах при начальных условиях ($x=0$ при $t=-\infty$):

$$X(t) = \int_{-\infty}^t e^{-\gamma_2(t-\tau)} \cdot F_g^2(\tau) d\tau \quad (8)$$

Правая часть (8) существует, если $|F_g(t)|^2$ ограничена при всех t или расходится при $\tau \rightarrow -\infty$ медленнее, чем $\exp(|\gamma_2 \cdot \tau|)$ (условие самосогласованности), где τ — текущее время. Применяя метод последовательных приближений и последовательное интегрирование по частям выражения (8), приходим к разложению (7), которое показывает **нелинейный характер** поведения сложных систем, функционирующих в условиях даже **незначительных внешних воздействий**.

«Принцип подчинения» позволяет исключить **подчиненные переменные** и получить замкнутые уравнения лишь для **набора параметров порядка**.

Литература:

- Пригожин И.** От существующего к возникающему. М.: Наука, 1983. 327 с.
Хакен Г. Синергетика: иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985. 419 с.