

УДК 550.3; 539.2; 53. 03; 53. 05

## ХАОТИЧЕСКИЕ И КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ГЕТЕРОГЕННОЙ НЕУПОРЯДОЧЕННОЙ СРЕДЕ

© 2011 г. В.В. Калинин<sup>1</sup>, М.Л. Владов<sup>1</sup>, А.В. Казак<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Московский научно-исследовательский центр Шлюмберже, г. Москва, Россия*

В первой части статьи кратко представлена история нелинейной динамики в физических, химических, биологических системах; во второй приведено описание лабораторного эксперимента, демонстрирующего возможность появления эффектов самоорганизации в таких средах, как цементные суспензии и флюидонасыщенные гетерофазные горные породы.

**Ключевые слова:** нелинейная динамика, нелинейная система, электрическое сопротивление, цемент, геологическая среда.

... Через несколько лет ... хаос вошел в моду. Затем хаос удостоили титула нелинейной науки и для его изучения начали создавать различные институты. Успешная история хаоса принял масштабы мыльного пузыря, так что все ученые, работавшие в этой области, должны были прыгать от радости. Некоторые действительно прыгают, другие – нет. Я попытаюсь объяснить почему. Однако физика хаоса, несмотря на частые триумфальные объявления о “новых” прорывах, в настоящее время практически не дает интересных открытий.

*Давид Рюэль. Случайность и хаос*

... Однако со временем выяснилось, что число систем, где можно наблюдать в сравнительно чистом виде предсказываемые диссипативные структуры, весьма невелико.

*Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. Нелинейная динамика и хаос*

### Введение

Три последних десятилетия отмечены бурным развитием понятий, связанных с нелинейной динамикой в физических, химических, биологических и прочих системах. Различным аспектам теоретического (и реже экспериментального) характера развития нелинейных процессов посвящены десятки монографий, каждая из которых снабжена сотнями ссылок на литературу по обсуждаемой тематике (см., например, [Малинецкий, Потапов 2006; Скотт, 2007; Неймарк, Ланда 2009]).

Ключевыми понятиями в этой области стали явления и процессы самоорганизации, порядка и хаоса, перехода диссипативных структур к упорядочиванию через флуктуации [Николаас, Пригожин, 1979; Полак, Михайлов 1983; Пригожин, Стенгерс, 1986; Хакен, 1980]. Основополагающие работы И. Пригожина и Г. Хакена выявили фундаментальное свойство неравновесных процессов – “неравновесие создает структуры” [Человек..., 2003, с. 13]. Хрестоматийные примеры таких явлений – ячейки Бенара в жидкостях; вихри Ленгмюра на шельфе морей; классическая периодическая химическая реакция Белоусова–Жаботинского; эффект Марангони, заключающийся в периодическом изменении концентраций в пограничном слое жидкость–газ.

В свете наших экспериментов особенно интересным представляется явление Помо–Манневила – переход ламинарного потока к хаосу через “перемежаемость”, – рас-

смаатриваемое как промежуточный режим, при котором интервалы хаотического поведения сменяются практически регулярными участками [Малинецкий, Потанов, 2006; Скотт, 2007]. Аналог этого процесса в медицине – внезапное сердцебиение, когда обычные почти периодические биения сердца вдруг прерываются быстрыми нерегулярными сокращениями, переходящими в хаотический режим (фибрилляцию), что часто приводит организм к смертельному исходу [Скотт, 2007].

Идеи самоорганизации (синергетики) наряду с уже более привычным понятием о фрактальной геометрии структуры горных пород, восходящим к работам М.А. Садовского (см., например, [Садовский, 1979]), проникли и в геологию. Им посвящена, в частности, прекрасно иллюстрированная и солидно обоснованная в теоретическом отношении монография П.М. Горяинова и Г.Ю. Иванюка “Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований” [Горяинов, Иванюк, 2001]. Однако эти идеи, на наш взгляд, обошли геофизику: нам известна только одна работа [Садовничий и др., 1999], в которой идеи самоорганизации рассматриваются в широком аспекте, включая собственно геофизические исследования вариаций геофизических полей.

На начальном этапе и в ходе длительного последующего периода исследования развивались под влиянием процессов, происходивших в системе “химическая реакция–нелинейная диффузия”. Объектами теоретических и экспериментальных исследований преимущественно были жидкости с колебательными химическими реакциями в них и подчас такие экзотические вещества, как гигантские нервные волокна кальмара [Скотт, 2007], по которым распространяются импульсы электрического тока. Если в некоторой системе происходят колебательные процессы (существуют осцилляторы), то по теореме Пуанкаре для возникновения хаоса из “ламинарного” состояния необходимо, по крайней мере, три осциллятора. По нашему мнению, существует объект, который в буквальном смысле слова находится у нас под ногами – осадочные горные породы самого разного генезиса.

В любой монографии, посвященной процессам в гетерогенных флюидонасыщенных породах, описываются реакции типа “химическая реакция–нелинейная диффузия” с такими характерными процессами, как подвод вещества к поверхности частиц твердого тела, акт химического взаимодействия, отвод образовавшегося в результате реакции вещества в объем раствора. Процессы переноса осуществляются за счет разницы концентраций в объеме раствора и на реакционной поверхности – молекулярной (ионной) диффузией, а при наличии перемешивания или потока реагирующих веществ – конвективной диффузией [Голубев, 1981]. Скорость каждой из составляющих определяется рядом физико-химических и термодинамических констант и может изменяться в широких пределах. Под действием этих факторов и при участии гравитации происходит возникновение фазовых контактов – соприкосновение отдельных частиц, причем обнаруживается скачкообразный переход от соприкасающихся частиц к их когезионному взаимодействию и зарождению пластических сдвигов в субмикроскопических объемах кристаллов [Физико-химическая ..., 1985]. Дополнительным эффектом роста и растворения кристаллов являются возникновение и исчезновение механического давления в объеме горной породы [Физико-химическая..., 1985]. Очевидно, что все это должно приводить к перестройке порового пространства и изменению процессов массопереноса флюидов.

Современные минеральные и органогенные осадки, молодые илы пресноводных и соленых бассейнов, сильно увлажненные и слаболитифицированные глины, суглинки и супеси образуют коагуляционные структуры. Взаимодействие частиц и микроагрегатов приводит к процессам структурирования системы на ранних стадиях седиментации в придонной зоне с образованием рыхлой пространственной сетки, характерной для так

называемых периодических структур [Физико-химическая ..., 1985]. В существенно более быстром временном масштабе подобные процессы протекают при замерзании и оттаивании грунтов, когда интенсивно образуются (и исчезают) кристаллизационные коагуляционно-цементационные связи в мерзлой зоне, коагуляционные и молекулярно-ионноэлектростатические связи в иссушаемой талой зоне [Козлова, 2004; Физико-химическая ..., 1985].

Фрактальная геометрия реальных природных гетерогенных сред, состоящих из почти всегда непроводящих агрегатов и проводящих электролитов в поровом пространстве, потенциально может приводить к появлению, так называемых, дуальных сред с аномальными электрическими свойствами с точки зрения школьных представлений об электропроводности в геологической среде [Гринченко, Мацыпура, Снарский, 2007; Крылов, Бобров, 2004; Исаев и др., 1995].

Последний фактор, который в этой несколько затянувшейся преамбуле приводит нас к геофизике и непосредственно к теме работы, – электрические поля естественного и искусственного происхождения. В последнем случае, который составляет предмет одного из малораспространенных методов электроразведки, описанного в [Королев, Филимонов, 2008; Рысс, 1983], под действием электрического поля, кроме естественного движения ионов в областях с неравномерной концентрацией растворённых веществ, наблюдается расслоенная структура движения положительных и отрицательных ионов в противоположных направлениях. Этот процесс связан с проявлением свойств самой жидкой фазы, ускоряющих движение ионов. Причиной циркуляции жидкой фазы, по видимому, является возникновение различия в плотности растворов у катода и анода, связанные с изменением состава и концентрации электролита [Рысс, 1983]. Под действием протекающего постоянного тока возникают хорошо известные процессы растворения скелета гетерогенных пород и переотложения продуктов реакции, при которых меняется геометрия порового пространства, развиваются электрокинетические явления массопереноса – электроосмос, электрофорез, электромиграция [Королев, Филимонов, 2008].

Бесспорным представляется тот факт, что все перечисленные эффекты обязательно флуктуируют во времени и пространстве. Как следствие, в геологической среде имеет место существование многочисленных взаимосвязанных осциллирующих физико-химических и пространственно-структурных полей. Таким образом, “чем больше присутствует осцилляторов и чем больше между ними существует связей, тем выше вероятность того, что вы увидите хаос” [Рюэль, 2001, с. 80].

В свете вышеизложенного в геологических средах высока вероятность развития сценария, подобного самоорганизации этих полей, и явлений перехода хаоса в порядок и обратно через флуктуации, как это установлено И. Пригожиным (см., например [Николаас, Пригожин, 1979]). Приведенные аргументы в пользу возможного возникновения коллективных процессов в геологических средах представляются авторам правдоподобными, но для скептически настроенного читателя могут явить образец “кривой логики” – ложного по существу словесного ухищрения, вводящего в заблуждение. Широко известным примером такого рода является цепь силлогизмов, приводящая к заключению о том, что Земля – полая сфера и на ее внутренней поверхности живут люди. Очевидно, что прямым доказательством возможности процесса типа самоорганизации в горный породах может быть прямой эксперимент.

Почти 12 лет тому назад, когда такой эксперимент был выполнен, “время и случай” определили объект исследования – твердеющий цемент. Первоначально целью исследования был поиск во временной динамике твердения цементной суспензии каких-либо характерных интервалов, в течение которых суспензия наиболее подвержена влиянию интенсивных акустических воздействий.

Общепринятый сценарий развития процесса твердения цемента состоит из двух взаимодействующих элементарных процессов: гидратообразования (химической реакции связывания воды с минеральными частицами и образованием продуктов реакции) и формирования пространственного каркаса структуры твердения и его упрочения. Оба процесса оказываются связанными друг с другом через кинетику гидрато- и структурообразования. На начальной стадии в реакцию гидратации вступают алюминат и алюмоферрит, благодаря более высокой по сравнению с алитом и белитом скорости растворения. Раствор становится пересыщенным по отношению к конечному продукту. Из пересыщенного раствора на поверхности зерен клинкера и в объеме раствора образуются иглообразные кристаллы гидроалюминатов и гидроферритов кальция различного состава в соотношениях, зависящих от термодинамических условий процессов гидратации [Мчедлов-Петросян, 2006; Комлева и др., 2008].

В результате этого процесса в цементной массе возникают пространственные связи, которые со временем приводят к уменьшению количества цементных зерен и формированию скелета иглообразных кристаллов (так называемой алюминатной структуры). В твердеющей массе одновременно с алюминатной структурой, но значительно медленнее возникают продукты гидратации силикатных клинкерных минералов алита и белита – гидросиликаты кальция [Комлева и др., 2008].

Цементная масса начинает твердеть, динамично меняется соотношение между ее твердой и жидкой фазами в сторону уменьшения последней. Естественно ожидаемым параметром, характеризующим описываемый процесс, является величина электрического сопротивления суспензии, в частности, на постоянном токе. Именно этот параметр исследовался в ходе проведенного на рубеже 1998–1999 гг. эксперимента, описание и результаты которого приводятся ниже.

### Приборы и оборудование

Принципиальная схема измерительной установки представлена на рис. 1. Цементной суспензией наполнялась до верхнего края круглая стеклянная чаша диаметром 80 мм, глубиной 70 мм и объемом 200 мл. В чашу на расстоянии примерно 40 мм друг от друга помещались два измерительных электрода из отрезков алюминиевого электротехнического провода диаметром 3 мм в полиэтиленовой изоляции. Контакт с цементной массой происходил на оголенных участках электродов длиной 25 мм, начальная часть которых находилась на глубине 20 мм. Такая геометрия установки была выбрана для уменьшения влияния токов, текущих по поверхности суспензии.

В экспериментах использовался промышленный цемент марок П 240, М 500 с отношением объемов “вода/цемент” от 0.6 до 0.8. Измерения проводились во временном интервале ~30–3600 с от момента приготовления смеси.

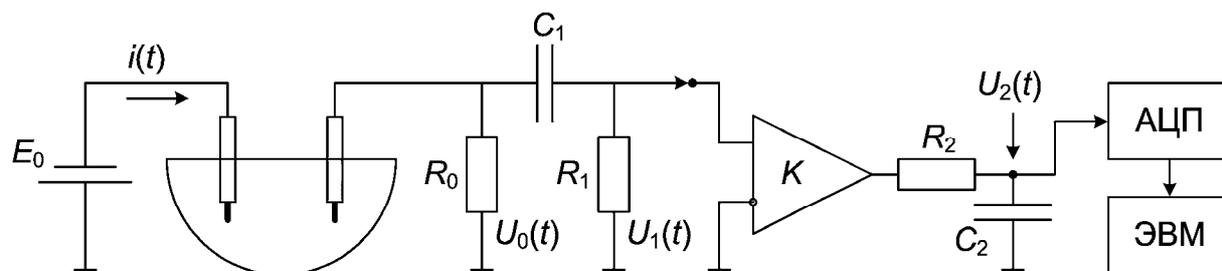


Рис. 1. Принципиальная схема измерительной установки (пояснение см. в тексте)

Дифференцирующая цепь  $R_1C_1$  подсоединялась к входу усилителя, выход которого был соединен с интегрирующей цепью  $R_2C_2$ . Полоса пропускания измерительного тракта  $\Delta f = 0.7\text{--}10$  Гц по уровню 0.707 от ее максимального значения. Операционный усилитель с коэффициентом усиления  $K = 1400$  подсоединялся к 12-разрядному аналого-цифровому преобразователю (АЦП), в свою очередь соединенному с электронно-вычислительной машиной (ЭВМ). Частота дискретизации переменной составляющей сигнала, выбранная на основе предварительного просмотра процесса на экране осциллографа и оценке его Фурье-спектра, составляла 40 Гц. Величина омического сопротивления суспензии  $R(t)$  в межэлектродном пространстве, измеренная на частоте 10–100 Гц, в течение всего времени измерений не превышала 70–100 Ом для всех использованных типов цементов.

Отметим, что в описываемом эксперименте физически наблюдаемой величиной является ток  $i(t)$ , связанный с измеряемым напряжением линейной зависимостью  $U_0(t) = R_0 i(t)$ . Формально в цепь можно ввести величину  $R(t)$  с размерностью  $[R(t)] = [R_0] = \text{Ом}$ . Однако природа процессов, описываемых величиной  $R(t)$ , может в общем случае отличаться от таковой для “истинно омической” среды. Для введенного таким способом параметра имеем следующие элементарные соотношения:

$$U_0(t) = E_0 \frac{R_0}{R_0 + R(t)} = E_0 \left[ 1 - \frac{R(t)}{R_0} + \left( \frac{R(t)}{R_0} \right)^2 - \dots \right].$$

При выбранном  $R_0 = 7.5$  кОм квадратичный член в разложении не превышает 0.01 от линейного члена; поэтому с указанной точностью переменная составляющая напряжения просто пропорциональна межэлектродному сопротивлению:

$$\tilde{U}_0(t) = -E_0 R(t)/R_0,$$

где  $\tilde{U}_0(t)$  – выходное переменное напряжение.

Источником питания в эксперименте служил низкоомный гальванический элемент с напряжением  $E_0 = 8.5$  В, предельный ток не превышал 1.1 мА, а межэлектродное напряжение – 70–100 мВ. При указанных параметрах не ожидалось возникновения значимого электролиза, во всяком случае, изменения состояния почти полированной поверхности алюминиевых электродов визуально не наблюдались.

### Результаты экспериментов

В соответствие с вышеизложенным сценарием процесса твердения суспензии ожидался шумоподобный характер наблюдаемого напряжения  $\tilde{U}_0(t)$ . Ток, протекающий в гетерофазной среде, состоящей из высокоомных зерен цемента, хаотически взвешенных в низкоомной жидкости, будет флюктуировать, проходя по межфазным мостикам с постепенно уменьшающимися промежутками, также хаотически распределенными во времени и пространстве.

Картина начального этапа твердения цементной суспензии для временного интервала 0–100 с представлена на рис. 2. На рис. 3 приведен пример полного цикла измерений в течение 3600 с. Обращает на себя внимание разнообразие протекания процессов твердения, проявляющееся в величине межэлектродного сопротивления. Тем не менее, всем им присуща одна и та же особенность – резко выраженный нестационарный характер флюктуаций и практическое отсутствие затухания процесса на всем интервале наблюдений в 3600 с.

При рассмотрении результатов измерений в более крупном (в 30–100 раз) масштабе по оси  $t$  (см. рис. 2) наблюдается вторая характерная особенность: функция  $\tilde{U}_0(t)$  может быть представлена в виде  $\tilde{U}_0(t) = \Omega(t)\zeta(t)$ , где  $\Omega(t)$  – “медленная” функция, кото-

рую условно можно назвать огибающей процесса с отчетливо выраженным свойством — она имеет ундулирующий характер с отношением величин максимальных значений к минимальным от 3 до 5–8. Функция  $\zeta(t)$  представляет последовательность импульсов, имеющих различную форму, амплитуду и интервалы появления на оси  $t$ . Все вышеизложенное представляет, по-видимому, достаточно ограниченный интерес, хотя и может быть использовано в технических приложениях для оценки качества цемента.

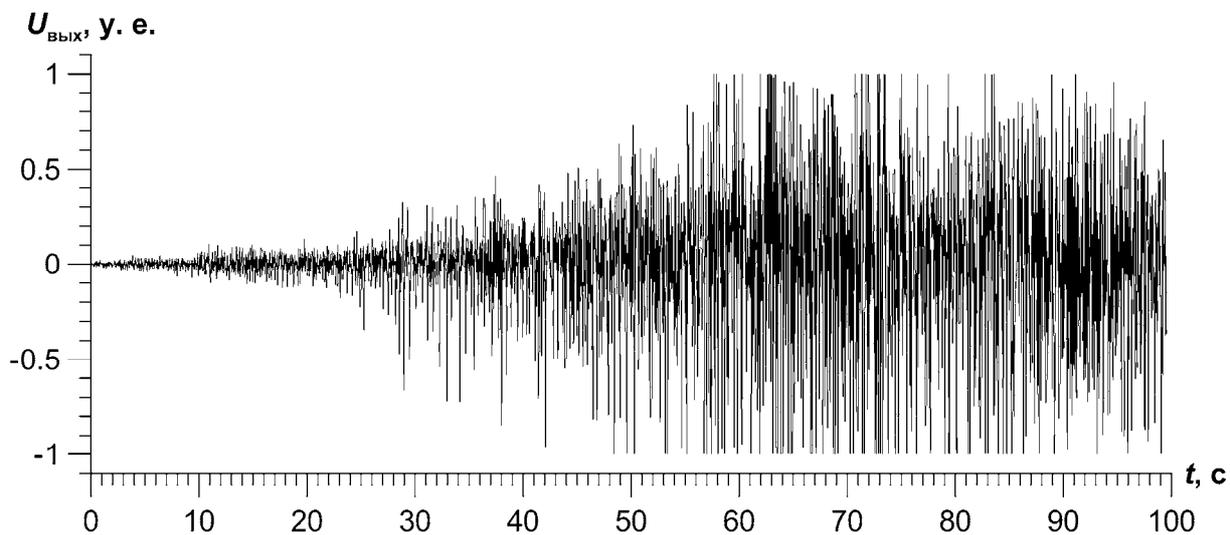


Рис. 2. Начальный этап твердения цемента на временном интервале 0–100 с

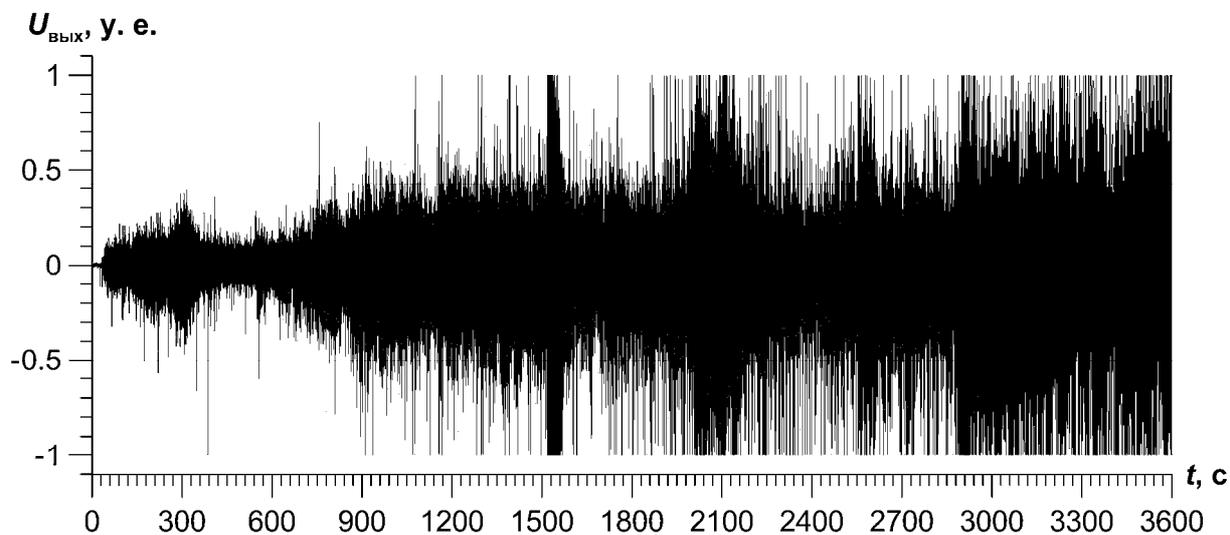


Рис. 3. Обзорная картина полного цикла измерений, демонстрирующая хаотические циклы в твердеющем цементе (масштаб по горизонтальной оси сжат по сравнению с рис. 2)

Нетривиальный и ожидаемый результат проведенных экспериментов состоит в следующем. В некоторый момент времени  $t^*$ , когда функция  $\Omega(t)$  достигает минимума, а затем начинает возрастать, система переходит в квазипериодический режим изменения  $R(t)$ , или, вернее сказать, тока  $i(t)$ <sup>1</sup>. На рис. 4 представлен набор наиболее характерных картин такого рода процессов.

<sup>1</sup> Ожидаемый результат был осознан путем обратной экстраполяции во времени, спустя годы после проведения опытов.

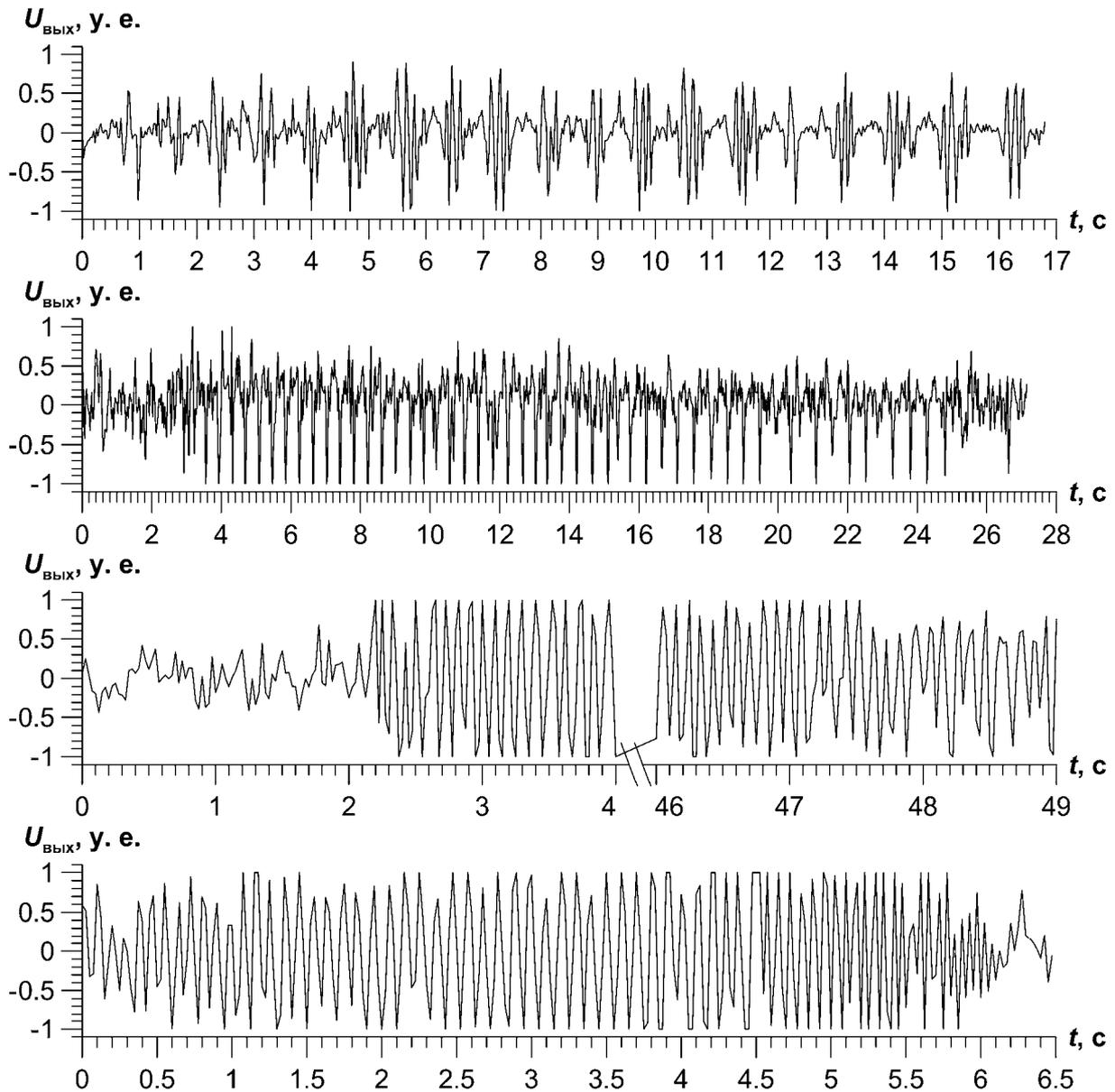


Рис. 4. Квазипериодические циклы в твердеющем цементе

Представленные картины видоизменяются от периодической последовательности импульсов, длительностью  $\sim 0.2$  с по основанию, к последовательности импульсов, напоминающих отклик резонансной системы на короткие толчки, далее к почти чисто синусоидальным колебаниям и, наконец, к синусоидальному по форме частотно-модулированному процессу с прогрессивно увеличивающейся частотой. Длительность таких периодических циклов меняется от 5–6 до 50 с. Заканчиваются циклы с несколько меньшей скоростью, чем возникают в моменты  $t^*$ . Абсолютные значения  $\check{U}_0(t)$  лежат в диапазоне 3–5 мВ, иногда возрастая, по-видимому, в несколько раз, так как регистрируемый сигнал становится клипированным из-за превышения диапазона АЦП.

На горизонтальной оси третьего сверху графика (см. рис. 4) отмечен разрыв между  $t=4$  с и  $t=46$  с – процесс в этом промежутке времени шел непрерывно и был практически аналогичен процессам, происходящим до и после него.

Напомним, что представленные на рис. 2–4 графики отражают только переменную составляющую тока  $i(t)$  (сопротивления  $R(t)$ ). В действительности она “живет” на

пьедестале с амплитудой  $\sim 70\text{--}80$  мВ, который изменяется на порядки медленнее, чем  $\Omega(t)$  по мере твердения суспензии и увеличения ее сопротивления. К сожалению, эта медленная составляющая процесса была прослежена только в отдельные моменты времени с интервалом в несколько минут.

### Обсуждение результатов

Наблюдаемый процесс твердения цемента во времени может быть описан как система с прогрессирующей степенью сложности, приводящей на отдельных временных интервалах к согласованной эволюции химических и пространственных структур. Следуя принятой терминологии, имеет место самоорганизация и коллективное поведение по типу перемежаемости хаоса и порядка.

Для объяснения возникновения описанных явлений могут быть предложены две гипотезы. Первая из них связана с феноменом пространственно-временной самоорганизации нелинейных сред в классе “реакция–диффузия”. Типовая математическая модель такого процесса в одномерном случае описывается нелинейным уравнением диффузии из [Павлов, Новиков, 2003]:

$$\varepsilon \frac{\partial U}{\partial t} = D \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + Q(U, A), \quad (1)$$

где  $U(x, t) = (U_1, U_2, U_3)$  – вектор, характеризующий состояние среды;  $Q = (Q_1, Q_2, Q_3)$  – вектор, задающий тип реакции, а  $Q_i$  – нелинейные функции своих аргументов;  $A$  – вектор числовых параметров,  $D = (D_1, D_2, D_3)$  – вектор коэффициентов одномерной диффузии по  $x$ -координате;  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ ,  $0 \leq \varepsilon_j \leq 1$  – специальные выделенные так называемые малые параметры.

Вычислительные эксперименты, проведенные авторами работы [Павлов, Новиков, 2003], выявили в двухкомпонентных системах возможность появления бегущих волн, периодических и хаотических автоколебаний, пульсирующих и самодстраивающихся контрастных структур. В трехкомпонентных системах возможно возникновение “дышащих” по осям  $t$  и  $x$  диссипативных структур, а также ведущих центров источников расходящихся волн. Вид того или иного процесса определяется, естественно, сочетанием значений параметров модели  $A$ ,  $D$  и  $\varepsilon$ . Различные комбинации этих параметров дают известные модели реакций Белоусова–Жаботинского, Вольтерра, Фитц-Хью Нагумо и ряд других [Павлов, Новиков, 2003]. Вышеприведенное описание процессов твердения цемента содержит необходимые ингредиенты, по-видимому, подпадающие под математическую модель (1).

В реальной ситуации возникновение пространственных связей, развивающихся во времени в форме скелета иглообразных кристаллов, еще более усложняет математическое описание текущей ситуации. Вместе с тем, полученные в эксперименте результаты допускают объяснение в рамках второй гипотезы, в которой ведущая роль отводится эволюции дендритоподобного структурного каркаса из кристаллитов, образующихся в процессе твердения цементной массы. Теоретическим обоснованием этого подхода служит работа [Баженов, Рабинович, Рубчинский, 1995].

Было выполнено аналитическое исследование уравнения Гинзбурга–Ландау типа диффузии с нелинейным членом:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \alpha - (1 + i\beta) |\alpha|^2 \alpha + (1 + i\alpha) \frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – действительные параметры;  $i = \sqrt{-1}$ . Установлено, что существует область параметров, где беспорядочное по пространству распределение поля обладает перио-

дическим поведением во времени. Временная эволюция пространственного распределения является сложной, включает процессы рождения и исчезновения структур, но во времени носит регулярный характер [Баженов, Рабинович, Рубчинский, 1995].

Конечно, физико-химические явления в нестационарном процессе твердения цемента носят более сложный характер, чем одномерные модели, описываемые уравнениями (1) и (2). Однако теоретическая возможность периодической эволюции пространственного беспорядка представляется привлекательной для объяснения явлений, выявленных нами в эксперименте.

В работе [Русинов, 1999] для объяснения возникновения ритмично-полосчатых гидротермальных пород, а также явлений в метасоматических системах с фильтрующимися через них флюидами привлекаются идеи синергетики, т. е. коллективного поведения. По необходимости причины появления наблюдаемых структур приходится объяснять апостериори, что может быть уязвимым местом предлагаемых механизмов их образования при критическом рассмотрении.

Если предлагаемое нами объяснение не является чисто спекулятивным, то оно потенциально допускает опытную верификацию и для природных объектов практически в реальном масштабе времени. При кристаллизации растворов, высыхании влажных и сыпучих материалов, уплотнении гранулированных сред, замерзании и оттаивании влажных почв и газогидратов, переотложении солей во флюидонасыщенных природных средах образуются дендритоподобные структуры, быстро развивающиеся во времени [Алексеев и др., 2000]. Как следствие, в таких средах можно ожидать появления временных картин, аналогичных тем, что представлены в настоящей статье по результатам лабораторного эксперимента. Используемый в эксперименте материал (цемент) по вещественному составу и характеру протекающих в нем физико-химических процессов, по нашему мнению, более близок горным породам, чем жидкие среды. В целом, проделанный эксперимент может служить демонстрацией явлений самоорганизации в геологической среде.

### Заключение

Полученные результаты, имеющие очевидный эвристический характер, требуют для своего объяснения математического описания, хотя в качественном отношении подтверждают возможность появления эффектов самоорганизации в таких средах как флюидонасыщенные гетерофазные горные породы. Во всяком случае, нами предьявлен объект, относящийся к системам, где можно в сравнительно чистом виде наблюдать предсказываемые диссипативные структуры, число которых весьма невелико, как это отмечено в эпиграфе к статье, взятом из [Малинецкий, Потапов, 2006].

Идеи синергетики все более агрессивно и широко выходят за пределы той области, в которой они зародились сначала в виде математических конструкций, а затем нашли экспериментальное подтверждение в химии и радиоэлектронике. Поэтому мы сочли необходимым предварить свою статью мнением авторитетного ученого Д. Рюэля, скептицизм и филиппики которого, возможно, будут полезны для взвешенного отношения к достижениям и перспективам нелинейной динамики.

### Благодарности

Авторы благодарят А.В. Калинину за подготовку исходных материалов в цифровом виде.

## Литература

- Алексеев В.Н., Громов А.Н., Громов Ю.И., Овчаренко А.Т., Рыбак С.А. Движение тел под действием вибрации в гранулированных средах // Акустический журнал. 2000. Т. 46, вып. 3. С.243–248.
- Баженов М.В., Рабинович М.И., Рубчинский Л.Л. Периодическая эволюция пространственного беспорядка в одномерном комплексном уравнении Гинзбурга–Ландау // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1995. Т. 38, № 1/2. С.37–42.
- Голубев В.С. Динамика геохимических процессов. М.: Недра, 1981. 208 с.
- Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований. М.: ГЕОС, 2001. 312 с.
- Гринченко В.Т., Мацыпура В.Т., Снарский А.А. Введение в нелинейную динамику. Хаос и фракталы. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. 264 с.
- Исаев Г.А., Нигматуллин Р.Р., Полетаев Н.Г., Сутин Н.Н. Фрактальный подход к изучению электропроводности горных пород // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 3. С.126–132.
- Козлова Е.В. Закономерности гидрато- и льдообразования в дисперсных газонасыщенных породах: дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2004. 148 с.
- Комлева С.Ф., Измухамбетов Б.С., Кондрашев О.Ф., Ногаев Н.А. Тампонажные растворы с пониженной водоотдачей / Под ред. Ф.А. Акзамова. Уфа: Изд-во науч.-техн. лит-ры “Монография”, 2008. 187 с.
- Королев В.А., Филимонов С.Д. Электрокинетическая очистка грунтов от загрязнений на застраиваемых территориях: опыт Нидерландов // Инженерная геология. 2008. № 2. С. 28–33.
- Крылов С.С., Бобров Н.Ю. Фракталы в геофизике. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2004. 138 с.
- Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Нелинейная динамика и хаос. Основные понятия. М.: КомКнига, 2006. 240 с.
- Мчедлов-Петросян О.П. Современные взгляды на процессы твердения цементов // Труды института Южгипроцемент. Новое в технологии и технике производства цемента. 2006. Вып. 4. С.144–153.
- Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: КД “Либроком”, 2009. 424 с.
- Николаас Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 512 с.
- Павлов Б.М., Новиков М.Д. Программные средства для исследования самоорганизации в активных распределенных системах // Синергетика. Труды семинара. Том 6. Естественнонаучные, социальные и гуманитарные аспекты. М.: МИФИ, 2003. С.129–140.
- Полак Л.С., Михайлов А.С. Самоорганизация в неравновесных физико-химических системах. М.: Наука, 1983. 286 с.
- Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. М.: Прогресс, 1986. 432 с.
- Русинов В.Л. Динамика и сценарии самоорганизации геологических систем // Синергетика. Т. 2. М.: Изд-во МГУ, 1999. С.113–120.
- Рысс Ю.С. Геоэлектрохимические методы разведки. Введение в геоэлектрохимию. Л.: Недра, Ленинградское отделение, 1983. 255 с.
- Рюэль Д. Случайность и хаос. Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. 192 с.
- Садовничий В.А., Козодеров В.В., Ушакова Л.А., Ушаков С.А. Новые методы описания эволюции природы и общества // Известия секции наук о Земле РАЕН. 1999. Вып. 5. С.6–19.
- Садовский М.А. Естественная последовательность горных пород // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 4. С.829–831.
- Скотт Э. Нелинейная наука: рождение и развитие когерентных структур. М.: Физматлит, 2007. 560 с.
- Физико-химическая механика природных дисперсных систем / Под ред. Е.Д. Щукина, Н.В. Перцова, В.И. Осипова, Р.И. Злочевской. М.: Изд-во МГУ, 1985. 266 с.
- Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 405 с.
- Человек перед лицом неопределенности / Под ред. И. Пригожина. Москва, Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 304 с.

*Сведения об авторах*

**КАЛИНИН Виктор Васильевич** – доктор физико-математических наук, профессор, МГУ им. М. В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: (495) 939-33-42. E-mail: kalinin.victor@mail.ru

**ВЛАДОВ Михаил Львович** – доктор физико-математических наук, профессор, МГУ им. М.В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: (495) 939-33-42. E-mail: vladov@geol.msu.ru

**КАЗАК Андрей Владимирович** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Московского научно-исследовательского центра Шлюмберже. 119285, г. Москва, ул. Пудовкина, д. 13. Тел.: (916) 629-13-25. E-mail: Andrey@Kazak.net

## CHAOTIC AND PERIODIC OSCILLATIONS OF DIRECT CURRENT IN HETEROGENEOUS DISORDERED MEDIUM

V.V. Kalinin<sup>1</sup>, M.L. Vladov<sup>1</sup>, A.V. Kazak<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Schlumberger Moscow Research Center, Moscow, Russia*

**Abstract.** The first part of the paper is devoted to a short overview of history and application of non-linear dynamics for characterization of various physical, chemical and biological systems. The second part gives a detailed description of a laboratory experiment demonstrating the possibility of self-organization effects in such systems as cement suspensions and saturated heterophase rocks.

**Keywords:** non-linear dynamics, non-linear system, electric resistance, cement, geomaterial, geological environment.