DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-3-114-123
УДК 622.691

О.А. Дышин, И.А. Габибов, К.Б. Ираванлы (Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОПРОВОДОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Oleg A. Dishin, Ibrahim A. Habibov, Konul B. Irvanli (Azerbaijan State Oil and Industrial University (Baku, Azerbaijan Republic))

MODELING OF DYNAMICS AND FORECASTING OF OPERATING CHARACTERISTICS OF GAS PIPELINES WITH VARIOUS COATINGS

Введение

Защита магистральных и внутрипромысловых трубопроводов от коррозионного воздействия является одной из важнейших задач, стоящих перед нефтяной отраслью.

Цели и задачи

Разработать программу прогнозирования показателей нефтяной динамической системы по временному ряду и применить ее для прогнозирования показателей водопроницаемости и адгезионной прочности газопроводов.

Методы

Для построения γ -мерной динамической модели функционирования газопровода использована техника реконструирования аттрактора системы по одномерной «проекции» фазовой траектории с помощью влияния фазового пространства в редуцируемое пространство размерности $m < n$. Выбор размерности пространства вложения произведен с учетом ложных ближайших соседей и ложных соседей на складках аттрактора.

Результаты

Установлено, что использование для покрытия газопровода материала БНИ+ФФО+БК по сравнению с объемными (БНИ) материалами дает преимущества по водопроницаемости и адгезионной прочности примерно в 7 раз, а материала

Background

Protecting the main and in-field pipelines from corrosion is one of the most important tasks facing the oil industry.

Aims and Objectives

Develop a program for predicting the indices of the oil dynamic system in terms of the time series and apply it to predict the water permeability and adhesion strength of the gas pipelines.

Methods

To construct the γ -dimensional dynamic model of gas pipeline functioning, the technique is used to reconstruct the attractor of the system from the one-dimensional «projection» of the phase trajectory by means of the influence of the phase space in the reduced space of dimension $m < n$. The choice of the dimension of the embedding space is made taking into account the false nearest neighbours and false neighbours in the folds of the attractor.

Results

It has been established that the use of the material BNI + FF + BK for coating the gas pipeline compared to bulk materials (BNI) gives advantages in terms of water permeability and adhesion strength approximately 7 times, and the material NANOBNI + FFO + BK - by water permeability 22 times and adhesion strength - in 17.

НАНОБНИ+ФФО+БК - по водопроницаемости в 22 раза и адгезионной прочности - в 17.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что разработанный программный продукт может быть использован для анализа и прогнозирования поведения как трубопроводных систем, так и различных динамических систем.

The practical value of the results obtained is that the developed software product can be used to analyze and predict the behavior of both pipeline systems and various dynamic systems.

Ключевые слова: магистральный газопровод, динамическая модель функционирования газопровода, реконструкция аттрактора, пространство вложения, фазовая траектория, скалярные временные ряды, ложные ближайшие соседи, ложные соседи на складках аттрактора

Key words: main gas pipeline, dynamic model of the gas pipeline operation, reconstruction of the attractor, embedding space, phase trajectory, scalar time series, false nearest neighbors, false neighbors on folds

Введение

Основными магистральными газопроводами Республики Азербайджан являются: Казимагомед-Астара протяженностью 196,5 км ($D = 1220$ мм, $P = 5,5$ МПа, $Q = 10$ млрд м^3 в год), Казимагомед-Казах I нитка протяженностью 378 км ($D = 1020$ мм, $P = 5,5$ МПа, $Q = 10$ млрд м^3 в год) и II нитка с одинаковой протяженностью ($D = 1220$ мм, $P = 5,5$ МПа, $Q = 13$ млрд м^3 в год) и Казимагомед-Ширвановка с протяженностью 240 км ($D = 1220$ мм, $P = 5,5$ МПа, $Q = 13$ млрд м^3 в год). Все операционные мероприятия на этих газопроводах осуществляет ПО «Газэкспорт».

Анализ результатов исследований по оценке состояния газопроводов показал, что все они в основном исчерпали свои ресурсы. Трассы газопроводов проходят участки с различными рельефами: равнинная степная местность, изрезанная балками, арыками, оврагами, с речками и каналами, через которые имеются воздушные переходы. В некоторых местах они пересекают пашни, засеянные различными культурами, сады, виноградники и заросли кустарников, корни которых в ряде случаев наносят повреждения изоляционному покрытию газопроводов.

Грунты на этих трассах разнообразны и представлены ступенями, песками, плотными

суглинками, тяжелыми глинами, гравием, которые в той или иной мере увлажнены и засолены.

Для оценки состояния газопроводов проводились исследования по критериям: разности потенциалов труб по шурфам и удельного сопротивления грунта [1]. Кроме этого осуществлялись ультразвуковой замер толщины стенки труб и оценка состояния антикоррозионной защиты газопроводов.

Ультразвуковой замер толщины стенки труб осуществлялся двумя методами: в местах отсутствия коррозии в 4-х точках по периметру трубы и в местах наличия коррозии в нескольких замерах в местах наиболее глубоких каверн и язв.

Анализ удельного сопротивления грунта на протяжении 3-х маршрутов газопровода показал, что оно изменяется в пределах $0,63\text{--}44,96 \times 10$. Сезонные колебания климата изменяются от минус 5°C до 46°C .

На основе представленных в таблице 1 временных рядов изменения показателей водопроницаемости (В) и адгезионной прочности (А) для покрытий трех видов (БНИ; БНИ+ФФС+БК; нанонизированный БНИ+ФФС+БК) для каждого показателя и вида покрытий (по месяцам) построены динамические модельные отображения, по которым получены прогнозные оценки показателей.

можно получить m -мерную реконструкцию A_R исходного аттрактора A как множество векторов $\mathbf{z}(t)$ в R^m при $m \geq 2d + 1$:

$$\mathbf{z}(t) = \{a(t), a(t + \tau), \dots, a(t + (m-1)\tau)\}.$$

В действительности на компьютере анализируется ряд значений переменной $a(t)$ в дискретные моменты времени $i\Delta t$, поэтому реконструируемое множество векторов также является дискретным $\mathbf{z}(i\Delta t)$, а величина τ , называемая задержкой, имеет вид $\tau = k \cdot \Delta t$, где k - целое число. Иными словами, на практике мы имеем вектор: $\mathbf{z}_i = \{a_i, a_{i+\tau}, \dots, a_{i+(m-1)\tau}\}$, где нижний индекс i соответствует моменту времени $i\Delta t$; $\mathbf{z}_i = \mathbf{z}(t_i) (i = 1, N)$.

Техника реконструирования состоит в выборе задержки τ , размерности пространства вложения m и в формировании массива векторов $\mathbf{z}(i\Delta t)$ [3-5].

Поведение вектора $\mathbf{z}_i$ будем моделировать с помощью отображения $\mathbf{z}_{i+1} = G(\mathbf{z}_i)$.

Это отображение сводится к более простому виду:

$$x_j(t_{i+1}) = x_{j+1}(t_i) \quad (j = \overline{1, m-1}), \quad x_m(t_{i+1}) = G(x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_m(t_i)),$$

что эквивалентно отображению

$$a_{i+m} = G(a_i, a_{i+1}, \dots, a_{i+m-1}). \quad (2)$$

Функцию G выберем в виде полинома порядка K :

$$G(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{l_1, l_2, \dots, l_m=0}^K c_{l_1, l_2, \dots, l_m} \prod_{i=1}^m x_i^{l_i}, \quad \sum_{i=1}^m l_i \leq K. \quad (3)$$

Для построения модели (3) нужно определить значения M коэффициентов: $M = (m + K)! / (m! K!)$.

Эти значения выбираются так, чтобы среднеквадратичная погрешность аппроксимации была минимальна (метод наименьших квадратов):

$$\varepsilon_{train}^2 = \frac{1}{N_{train} - m} \sum_{i=1}^{N_{train}-m} [a_{i+m} - G(a_i, a_{i+1}, \dots, a_{i+m-1})]^2 \rightarrow \min.$$

Здесь N_{train} - число первых значений наблюдаемой величины a_i , используемых для построения модели, поэтому ряд $a_i, a_{i+1}, \dots, a_{i+m-1}, a_{i+m}$ называют «тренировочным». Поскольку модель (2) будет использована нами для целей прогнозирования, более надежная характеристика качества модели (2) определяется как погрешность аппроксимации на тестовой последовательности $\{a_k\}$, $k = N_{train} + 1, N$:

$$\varepsilon_{test}^2 = \frac{1}{N - N_{train}} \sum_{i=N_{train}+1}^{N-m} [a_{i+m} - G(a_i, a_{i+1}, \dots, a_{i+m-1})]^2 \rightarrow \min.$$

Степень K полинома (3) выбирается перебором K от 1 до K_{max} по критерию

$$\max(\varepsilon_{train}, \varepsilon_{test}) \rightarrow \min_{K=1, K_{max}}. \quad (4)$$

2. Выбор размерности пространства вложения m

При аппроксимации отображения (2) в некоторой точке $(a_i, a_{i+1}, \dots, a_{i+m-1})$ используются значения в ближайших соседних точках $\mathbf{z}_i$ и $G(\mathbf{z}_i)$. При этом предполагается, что для близких пар точек $\{\mathbf{z}_0, \mathbf{z}_k\}$ в реконструированном пространстве их прообразы в исходном пространстве $\{\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_k\}$ также близки. Однако свойства отображения

$$\mathbf{z}(t) = \Lambda_m(\mathbf{x}(t)) = \{a(t), a(t + \tau), \dots, a(t + (m-1)\tau)\}$$

оказываются таковыми, что данное предположение иногда нарушается. В реконструкции возникают ложные соседи. Их условно можно разделить на два типа [6], которые иногда называют ложными ближайшими соседями (False Nearest Neighbours - FNN) и ложными соседями на складках аттрактора (False Neighbours on Folds - FNF). Они соответствуют двум типам искажений: FNN возникают при слишком малых длинах окна реконструкции, а FNF - при слишком больших.

Для аттракторов малой размерности обычно существует интервал значений параметров m и τ , при которых соседи FNN уже исчезли, а соседи FNF еще не возникли. Для аттракторов большой размерности оба типа ложных соседей могут даже сосуществовать. Именно из-за этого эффекта реконструкция может стать вообще неприменима для динамических методов обработки временных рядов [6].

Существует простой метод целочисленной оценки размерности аттрактора m сверху с учетом ложных ближайших соседей (FNN), так называемый «метод ложных соседей» [5]. Он основан на проверке того свойства, что фазовая траектория, восстановленная в пространстве достаточной размерности, не должна иметь самопересечений.

Один из вариантов алгоритма таков [5]. При пробной размерности m для каждого восстановленного вектора

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_k^P &= (s_k, s_{k+1}, \dots, s_{k+m-1}), \\ (k &= m+1, \dots, N-m+1) \end{aligned}$$

отыскивают обычно ближайшего соседа

$$\mathbf{z}^{NN}(k) = d(s_k^{NN}, s_{k+1}^{NN}, \dots, s_{k+m-1}^{NN}).$$

Увеличив m на 1, определим какие из соседей оказались ложными, а какие истинными (определение ложных соседей приводится ниже).

Вычислим

$$\lambda = \frac{\text{Число ложных соседей } \mathbf{z}^{NN}(k)}{\text{Общее число восстановленных векторов } \mathbf{z}^P(k)}. \quad (5)$$

Отложим это число в зависимости от m на плоскости (m, λ) . Если при увеличении m это относительное число самопересечений λ уменьшается до 0 при некотором значении m^* , то последнее и есть оценка размерности пространства, в котором достигается вложение траектории моделируемого процесса. На практике, начиная с некоторой «правильной» размерности m^* , число ложных соседей становится достаточно малым (но не строго нулевым из-за шумов и т.д.) и далее не уменьшается. Такое значение m^* принимают в качестве оценки размерности модели.

Ложных соседей будем определять по следующим критериям [7, 8].

Критерий 1. Пусть $\mathbf{z}^{NN}(k)$ - ближайший сосед к вектору $\mathbf{z}_k^P = (s_k, s_{k+1}, \dots, s_{k+m-1})$ в евклидовом пространстве R^m , причем расстояние между векторами $\mathbf{z}_k^P$ и $\mathbf{z}^{NN}(k)$ определяется в обычной евклидовой метрике. Тогда расстояние $R_m(k)$ между векторами $\mathbf{z}_k^P$ и $\mathbf{z}^{NN}(k)$ будет $R_m(k) = \sum_{l=0}^{m-1} (s_{k+l} - s_{k+l}^{NN})^2$.

В пространстве R^{m+1} вектора $\mathbf{z}_k^P$ и $\mathbf{z}^{NN}(k)$ имеют те же компоненты, что и в R^m , первые m компонент, а их $(m+1)$ -е компоненты будут соответственно s_{k+m} и s_{k+m}^{NN} . При этом $R_{m+1}^2(k) = R_m^2(k) + (s_{k+m} - s_{k+m}^{NN})^2$.

Будем считать точки $\mathbf{z}_k^P$ и $\mathbf{z}^{NN}(k)$ ложными соседями, если

$$\frac{|s_{k+m} - s_{k+m}^{NN}|}{R_m(k)} > \tilde{R}, \quad (6)$$

где $10 \leq \tilde{R} \leq 50$.

Как указано в [8], при использовании данного критерия необходимо проявлять определенную осторожность. А именно, если применять его к данным, полученным с помощью высокоразмерного датчика случайных чисел, он будет показывать, что множество наблюдений может быть вложено в пространство малой размерности. При увеличении числа анализируемых точек определяемая с его помощью размерность вложения будет возрастать. В связи с этим при равномерном распределении объектов (точек) в d -мерном пространстве при фиксированном числе точек возникает следующая проблема: точки должны все больше удаляться друг от друга, поскольку d увеличивается, и большинство из заданных точек будут разделены большим расстоянием. При бесконечно большом объеме данных такой проблемы не возникает, а при конечном объеме данных в силу уменьшения определяемой размерности вложения (как было указано выше) случайно все точки будут иметь «ближайших соседей», что не

позволит слишком сильно раздвигать их в пространстве. В этом случае тот факт, что точки являются ближайшими соседями, вовсе не означает, что они близки друг другу в смысле расстояния в пространстве размерности, равной приближенной размерности аттрактора R_A . Если ближайший сосед к $\mathbf{y}(k)$ на самом деле будет к нему близок, так что $R_d(k) \approx R_A$, то $R_{d+1}(k) \approx 2R_d(k)$. Это означает, что расстояние между ближайшими соседями будет расширяться до экстремальных значений расстояний на аттракторе, т.е. такие соседи могут оказаться ложными ближайшими соседями.

Поэтому на практике для проверки ложности ближайших соседей используется дополнительный критерий.

Критерий 2. Точки $\mathbf{z}(k)$ и $\mathbf{z}^{NN}(k)$ являются ложными соседями, если

$$\frac{R_{m+1}(k)}{R_A} \geq 2, \quad (7)$$

$$\text{где } R_A^2 = \frac{1}{N-2m-1} \sum_{k=m+2}^{N-m} (s_k - \bar{s})^2,$$

$$\bar{s} = \frac{1}{N-2m-1} \sum_{k=m+2}^{N-m} s_k,$$

N - объем выборки данных.

Если ближайшие соседи хотя бы по одному из этих двух критериев окажутся ложными, будем считать их ложными соседями.

Ложные ближайшие соседи возникают, когда размерность вложения m очень мала, тогда две различные точки, лежащие на аттракторе, после проектирования в пространство вложения могут совпадать, образуя тем самым точки типа FNN. Этот эффект еще более усиливается, когда к тому же мало время задержки τ [8-10].

Для высокоразмерных систем метод задержки применим для реконструкции системы, хотя и с большими трудностями, при этом FNN всегда существуют и могут сосуществовать вместе с FNF [10, 11]. При наличии FNF размерность пространства вложения определяется с помощью корреляционного интеграла [11].

При полном числе N_2 пар $(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j)$ в пространстве вложения R^m корреляционный интеграл $C(\varepsilon)$ на заданном масштабе ε определяется формулой [11]:

$$C(\varepsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N_2} \sum_{i,j(i \neq j)} \theta(\varepsilon - \|\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_j\|), \quad (8)$$

где $\theta(x)$ - функция Хевисайда: $\theta(x) = 1$ при $x > 0$ и $\theta(x) = 0$ при $x \leq 0$;

$$N_2 = C_{N-(m-1)}^2 = \frac{1}{2}(N-m)(N-m+1).$$

Корреляционная размерность ν определяется в виде предельного равенства

$$\nu = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\ln C(\varepsilon, N)}{\ln \varepsilon}, \quad (9)$$

$$C(\varepsilon, N) = N_2^{-1} \sum_{i,j(i \neq j)} \theta(\varepsilon - \|\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_j\|). \quad (10)$$

В численных экспериментах N всегда конечно, и оба предела $\varepsilon \rightarrow 0$ и $N \rightarrow \infty$ являются бессмысленными; поэтому отношение $\ln C(\varepsilon, N) / \ln \varepsilon$ рассматривается при не слишком малых значениях ε .

Для вычисления размерности вложения m с помощью корреляционной размерности ν поступают следующим образом [10]. Выбирают произвольное малое значение размерности пространства вложения m (например $m=1$) и вычисляют ν по наклону линейного участка графика $\ln C(\varepsilon, N)$ от $\ln \varepsilon$. Затем увеличивают m на 1 и вновь определяют ν . Таким образом, анализируется зависимость результатов расчета корреляционной размерности от выбора m -размерности пространства вложения. Этот прием позволяет сделать вывод о существовании маломерной динамики ($\nu < 4$): при ее наличии зависимость $\nu(m)$ быстро достигает насыщения, и при дальнейшем увеличении m величина ν не меняется в пределах точности вычислений. При этом линейный участок зависимости $\ln C(\varepsilon, N)$ от $\ln \varepsilon$ становится параллельным оси $\ln \varepsilon$ (с углом наклона равным 0), что отражается на графике $(\ln C(\varepsilon, N), \ln \varepsilon)$ в ви-

де плато. Значение $m = m^*$, соответствующее этому плато, принимается за истинное значение размерности пространства вложения.

Если маломерная динамика отсутствует, то ν увеличивается с ростом m . В этом случае при достаточно больших m возможно насыщение, которое обусловлено фундаментальными ограничениями на значение корреляционной размерности, связанными с конечной длиной анализируемого временного ряда N_{t0t} :

$$\nu_{\max} \approx \frac{2 \ln N_{t0t}}{\ln(1/r)}, \quad r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}}, \quad (11)$$

где $\varepsilon_{\max}$ значение ε , при котором $C=1$.

3. Прямой и итерационный методы прогноза по динамическому модельному отображению

Прямой метод прогноза состоит в том, что для прогноза T интервалов выборки вперед (с учреждением T) по модели (2) непосредственно аппроксимируют с шагом 1 предсказанные значения $a(t)$ в моменты времени $t_{N+1}, t_{N+2}, \dots, t_{N+T}$, используя одно и то же отображение G , построенное по критерию (4). При этом уже найденные аппроксимации $a(t_{N+1}), a(t_{N+2}), \dots, a(t_{N+T})$ и т.д. используются в качестве новых известных значений наблюдаемой величины $a(t)$.

В итерационном методе прогноза прогнозное значение $a^{np}(t_{N+1})$ вычисляется как и в прямом методе прогноза. Последующие прогнозные значения строятся иначе.

Для построения прогноза в точке t_{N+2} , считая $a^{np}(t_{N+1})$ как известное значение, разбиваем интервал $[1, N+1]$ заново на тренировочную (обучающую) выборку $[1, N_{train}^H]$ и тестовую (проверочную) выборку $[N_{train}^H + 1, N+1]$. Повторяем этапы 1 и 2, в результате находим «правильные» m^H и K^H («H» означает новые) и строим прогноз

$a^{np}(t_{N+2}) = G^H(a_{N-m+2}, a_{N-m+3}, \dots, a_{N+1})$. Аналогично строятся последующие прогнозы в точках $t_{N+3}, \dots, t_{N+T}$. В работе [3] показано, что точность прогноза с использованием итерационного метода несколько выше.

4. Численная реализация метода и обсуждение результатов

Размерность пространства вложения m определялась с помощью критериев 1 и 2, определяющих ложных соседей типа FNN, а также с помощью корреляционного интеграла, определяющего ложных соседей типа FNF.

Численное значение наименьшей размерности пространства вложения, найденное с помощью критериев 1 и 2 и с помощью корреляционного интеграла, $m=2$.

При построении динамической модели по временному ряду с $m=2$ испытывались полиномы с $K \leq 4$. Наилучшей оказалась модель с $K=2$. Прогнозные значения по такой модели строились итерационным методом прогноза.

В таблице 2 и на рисунках 1 и 2 показаны исходные данные (за последние 6 месяцев) и прогнозные (ретро и будущие) значения водопроницаемости и адгезионной прочности испытываемых материалов.

Соотношения между фактическими значениями показателей водопроницаемости рассматриваемых материалов (БНИ; БНИ+ФФС+БК; нанонизированный БНИ+ФФС+БК) на последнем 36-м месяце наблюдения и между соответствующими прогнозными значениями на 45-м месяце почти одинаковы 22 : 3 : 1, и для показателей адгезионной прочности 1 : 7 : 17.

Относительные изменения прогнозных значений через 45 месяцев и наблюдаемых значений через 36 месяцев (%):

для водопроницаемости 2,1; 1,2; 7,7;
для адгезионной прочности 2,0; 9,9; 0,6.

Таблица 2. Исходные данные за последние 6 месяцев и прогнозные значения водопроницаемости и адгезионной прочности испытуемых материалов

Материалы покрытия	Изменения водопроницаемости покрытия по месяцам, %				
	Ретро прогноз		Будущие		
	33	36	39	42	45
БНИ	0,507	0,516	0,524	0,523	0,525
БНИ+ФФС+БК	0,074	0,750	0,0753	0,756	0,0759
Нанонизированный БНИ+ФФС+БК	0,0218	0,0221	0,0222	0,0223	0,0224
БНИ	Изменения адгезионной прочности покрытия по месяцам, МПа				
	5,61	5,46	5,26	5,03	4,91
БНИ+ФФС+БК	37,90	37,80	37,73	37,60	37,48
Нанонизированный БНИ+ФФС+БК	85,68	85,62	85,48	85,40	85,31

Рисунок 1. Изменение водопроницаемости покрытия, %

Рисунок 2. Изменения адгезионной прочности покрытия, МПа

Выводы

Таким образом, по сравнению с обычным (БНИ) материалом покрытия использование БНИ+ФФС+БК дает преимущество по водопроницаемости и адгезионной прочности примерно в 7 раз, а использование

НАНОБНИ+ФФС+БК дает преимущество по водопроницаемости в 22 раза и по адгезионной прочности в 17 раз.

Наибольшее относительное уменьшение показателя водопроницаемости (7,7 %) дает нанонизированный БНИ+ФФС+БК.

Список литературы

1. О техническом состоянии магистрального газопровода «Казань-Магомед-Казань» по результатам диагностирования методом магнитной томографии. М.: НТЦ «Транскор-К», 2007. 112 с.
2. Takens F. Detecting Strange Attractors in Turbulence // *Dynamical Systems and Turbulence*. Warwick, 1980. Vol. 898. P. 366-381.
3. Casagagli M. Nonlinear Prediction of Chaotic Time Series // *Physics D*. 1989. Vol. 35. P. 335-356.
4. Безручко Б.П., Смирнов Д.А. Построение модельных отображений по хаотическим временным рядам. Саратов, 2000. 38 с.
5. Безручко Б.П., Смирнов Д.А. Математическое моделирование и хаотические временные ряды. Саратов: Изд-во «Колледж», 2005. 319 с.
6. Potapov A., Kurths J. Correlation Integral as a Tool for Distinguishing between Dynamics and Statistics in Time Series Data // *Physics D*. 1998. No. 120. P. 369-385.
7. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 336 с.
8. Schreiber T. Determination of the Noise Level of Chaotic Time Series // *Phys. Rev.* 1993. E48. P. RB-R16.
9. Abarbanel H.D.I., Brown R., Sidorovich I.I., Tsimring L.Sh. The Analysis of Observed Chaotic Data in Physical Systems // *Reviews of Modern Physics*. October 1993. Vol. 65, No. 4. P. 1331-1392.
10. Павлов А.Н. Методы анализа сложных сигналов. Саратов: Научная книга, 2008. 120 с.
11. Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 240 с.

References

1. *O tekhnicheskom sostoyanii magistral'nogo gazoprovoda «Kazi-Magomed-Kazakh» po rezul'tatam diagnostirovaniya metodom magnitnoi tomografii* [About Technical Condition of the Main Gas Pipeline «Kazi-Magomed-Kazakh» Based on the results of Magnetic Tomography Diagnosis]. Moscow, NTTs «Transkor-K», 2007. 112 p. [in Russian].
2. Takens F. Detecting Strange Attractors in Turbulence. *Dynamical Systems and Turbulence*. Warwick, 1980, Vol. 898, pp. 366-381.
3. Casagagli M. Nonlinear Prediction of Chaotic Time Series. *Physics D*, 1989, Vol. 35, pp. 335-356.
4. Bezruchko B.P., Smirnov D.A. *Postroenie model'nykh otobrazhenii po khaoticheskim vremennym ryadam* [Model Mapping Construction using Chaotic Time Series]. Saratov, 2000. 38 p. [in Russian].
5. Bezruchko B.P., Smirnov D.A. *Matematicheskoe modelirovanie i khaoticheskie vremennye ryady* [Mathematical Modeling and Chaotic Time Series]. Saratov, Kolledzh Publ., 2005. 319 p. [in Russian].
6. Potapov A., Kurths J. Correlation Integral as a Tool for Distinguishing between Dynamics and Statistics in Time Series Data. *Physics D*, 1998, No. 120, P. 369-385.
7. Malinetskii G.G., Potapov A.B. *Sovremennye problemy nelineinoy dinamiki* [Modern Problems of Nonlinear Dynamics]. Moscow, Editorial URSS, 2000. 336 p. [in Russian].
8. Schreiber T. Determination of the Noise Level of Chaotic Time Series. *Phys. Rev.*, 1993, E48, pp. RB-R16.
9. Abarbanel H.D.I., Brown R., Sidorovich I.I., Tsimring L.Sh. The Analysis of Observed Chaotic Data in Physical Systems. *Reviews of Modern Physics*, October 1993, Vol. 65, No. 4, pp. 1331-1392.
10. Pavlov A.N. *Metody analiza slozhnykh signalov* [Methods for Complex Signals Analyzing]. Saratov, Nauchnaya kniga Publ., 2008. 120 p. [in Russian].
11. Shuster G. *Determinirovannyi khaos: Vvedenie: Per. s Angl.* [Deterministic Chaos: Introduction: Transl. from Engl.]. Moscow, Mir Publ., 1988. 240 p. [in Russian].

Авторы

• Габибов Ибрагим Абульфас оглы, д-р техн. наук, профессор
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
Заведующий кафедрой «Инженерная и компьютерная графика»
Азербайджанская Республика, Аз 1010, Баку, пр. Азадлыг, 20
e-mail: h.ibo@mail.ru

• Дышин Олег Александрович, канд. физ.-мат. наук, доцент
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
Советник ректора
Азербайджанская Республика, Аз 1010, Баку, пр. Азадлыг, 20

• Ираванлы Конул Байрам гызы
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
Аспирант
Азербайджанская Республика, Аз 1010, Баку, пр. Азадлыг, 20

The Authors

• Habibov Ibrahim A., Doctor of Engineering Sciences, Professor
Azerbaijan State Oil and Industrial University
Head of Engineering and Computer Graphics Department
20, Azadliq ave., Baku, Azerbaijan, Az 1010,
e-mail: h.ibo@mail.ru

• Dishin Oleg A., Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Azerbaijan State Oil and Industrial University
Rector's Advisor
20, Azadliq ave., Baku, Azerbaijan, Az 1010

• Iravanli Konul B.
Azerbaijan State Oil and Industrial University
Post-graduate Student
20, Azadliq ave., Baku, Azerbaijan, Az 1010