

---

---

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

---

---

УДК 311.2; 51-7

## ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ИНДИКАТОРА ХЕРСТА И ЛОГИСТИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ

© 2021 В.Я. Шпицер, В.В. Кривин, В.А. Толстов

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, Волгодонск, Россия*

В статье представлены результаты идентификации предотказных состояний. Результаты основаны на фрактальном анализе и непараметрической статистике. Элементы оборудования АЭС – это высоконадежные системы длительной эксплуатации. Для них характерны постепенные отказы. Это случается по причине накопления необратимых повреждений. Штатные информационно измерительные комплексы поставляют временные ряды. Они традиционно обрабатываются параметрическими методами. Обработка данных, накопленных экспериментально, может быть автоматизирована для промышленного мониторинга параметров оборудования АЭС.

*Ключевые слова:* диагностика, предсказание, контролируемые параметры, обработка данных, деградация, индикатор Хёрста, наблюдение, мониторинг, логистические методы, предотказные состояния, нормативные интервалы, распределение вероятности.

Поступила в редакцию 24.08.2021

После доработки 28.09.2021

Принята к печати 06.10.2021

### Введение

Главной задачей предсказательной диагностики является выявление устойчивых трендов основных технологических индикаторов, которые, как предполагается, сохраняются на всем периоде наблюдений.

Исходим из того, что сложная техническая система обладает ограниченным ресурсом, ее параметры поддерживаются в нормативных пределах. Эксплуатирующая организация дополнительно устанавливает контрольные уровни параметров, по которым осуществляет мониторинг. Контрольный образ системы образует соответствующий вписанный в норму гиперпараллелепипед. Физически деградация представляет собой ансамбль случайных, диссипативных процессов, обуславливающих возрастание энтропии.

Будем рассматривать деградацию как неконтролируемое изменение системы во времени. Это может быть разрегулирование (по управляющим параметрам), стохастический дрейф физических свойств, накопление необратимых повреждений и несоответствий. Как правило, причины деградации не могут быть учтены при построении математической модели объекта. Задача состоит в том, что помимо математических ожиданий коэффициентов модели необходимо по выборке определить, неизвестные априори, свойства дрейфа.

В условиях непрерывного мониторинга основных технологических параметров оборудования АЭС традиционно ищут наилучшее приближение к действительным значениям коэффициентов, например, регрессионной модели «вход – выход». В такой постановке пространство сигналов отображается в пространство коэффициентов модели, а основным параметром отображения является объём выборки. Регрессионная модель даёт возможность вычислять моменты времени превышения пределов для основных технологических параметров и восстанавливать плотность распределения

этих моментов. По восстановленной плотности рассчитывают средний (ожидаемый) остаточный ресурс и гарантированный (гамма-процентный) остаточный ресурс. В этой технологии приходится использовать гипотезу о нормальности распределений [1, 2].

В работе [3] комплексным решением многих проблем считается анализ самоподобных фрагментов временных рядов (фрактальный анализ). Этот подход был применён для предсказания момента превышения контрольных пределов при мониторинге эксплуатационных параметров оборудования АЭС. В этой работе демонстрируется предсказательная диагностика, основанная на вычислении коэффициента Хёрста и оценки эмпирической вероятности превышения предела. В такой постановке пространство сигналов отображается в единичный гиперкуб.

### Показатель Хёрста

Показатель Хёрста (коэффициент Хёрста) – базовый параметр фрактального анализа. Этой мерой широко пользуются при исследовании финансовых временных рядов и биржевых индексов [3-6]. Основой статистической модели Г.Э. Хёрста является формула Альберта Эйнштейна, связывающая расстояние, которое проходит случайная блуждающая частица, и квадратный корень из времени  $R = T^{0.5}$ . Сущность модели Хёрста: размах вариации равен корню из количества испытаний. Значение коэффициента Хёрста, равное 0,5, соответствует чистому случайному процессу.

Отрезок временного ряда  $\{x(i)\}$ ,  $i = 1, \dots, n$  объёма  $n$  будем представлять через следующие величины:

$$\text{Среднее значение } \langle x(n) \rangle = 1/n \sum_i^n x(i).$$

$$\text{Стандартное отклонение } S(n) = \sqrt{1/n \sum_i^n [x(i) - \langle x(n) \rangle]^2}.$$

Накопленное за  $m$  измерений отклонение от среднего значения:

$$X(m, n) = \sum_{u=1}^m [x(u) - \langle x(n) \rangle].$$

$$\text{Размах } R(n) = \max_m X(m, n) - \min_m X(m, n), \quad 1 \leq m \leq n.$$

Установлено, что для большого числа природных явлений и процессов справедлив эмпирический закон Хёрста:

$$R(n)/S(n) = (n/2)^H.$$

Это соотношение даёт возможность на множествах экспериментальных данных вычислять показатель Хёрста  $H$ , как угловой коэффициент линейной регрессии в координатах  $(\log \frac{R(n)}{S(n)}, \log (\frac{n}{2}))$ .

Пусть задан сигнал, содержащий  $N = 3000$  измерений. Выделяем фрагменты размером, например, по  $n = 300$  измерений. Каждый фрагмент разбиваем на элементы, например, по  $m = 30$  измерений. Для каждого элемента вычисляем сумму отклонений от среднего в своём фрагменте. Для всех элементов вычисляем размах и делим его на среднеквадратическое данного фрагмента. Для всех фрагментов в координатах  $(\log \frac{R(n)}{S(n)}, \log (\frac{n}{2}))$  получаем ансамбль точек (в данном примере 10 шт.). Далее методом наименьших квадратов на этих точках находим коэффициенты уравнения прямой. Значение углового коэффициента и есть оценка показателя Хёрста.

Показатель Хёрста связывают с мерой самоподобия или мерой длительности долгосрочного трендового (персистентного) поведения стохастического процесса. Так диапазон  $0 < H < 0.5$  соответствует антиперсистентным рядам, т.е. рост в предыдущем периоде, вероятно, сменится на спад в последующем. Диапазон  $0.5 < H < 1$  соответствует персистентным рядам, т.е. рост в предыдущем периоде сохранится как тенденция и в последующем. Чем ближе значение  $H=0.5$  тем ряд более зашумлён и тем

менее проявляется его тренд. Так для случайного процесса с независимыми приращениями и конечной дисперсией по соотношению Эйнштейна  $H=0.5$ . Предположительно значение  $H=0.5$  связано с периодическими или квазипериодическими вариациями наблюдаемой величины.

Помимо роли классификационного признака показатель Хёрста может непосредственно фиксировать деградацию в форме разрушения. Так глубина деформированного слоя, в котором происходит локализация деформации, имеет выраженную тенденцию к росту в направлении к свободной поверхности. Переход от зоны локализации пластической деформации к зоне разрушения характеризуется резким увеличением показателя Хёрста [7].

Алгоритм построен на циклах и выполняется достаточно быстро даже на ограниченных вычислительных ресурсах, поэтому может составить ядро системы мониторинга. Адекватность процедуры тем выше, чем больше объём вовлекаемых данных.

На рисунке 1 представлен промышленный сигнал (температура масла в гидравлической системе главного циркуляционного насоса ГЦН АЭС) в коридоре контрольного ( $39^{\circ}\text{C}$ ) и предельно допустимого ( $41^{\circ}\text{C}$ ) значений, как функция номера регистрации.

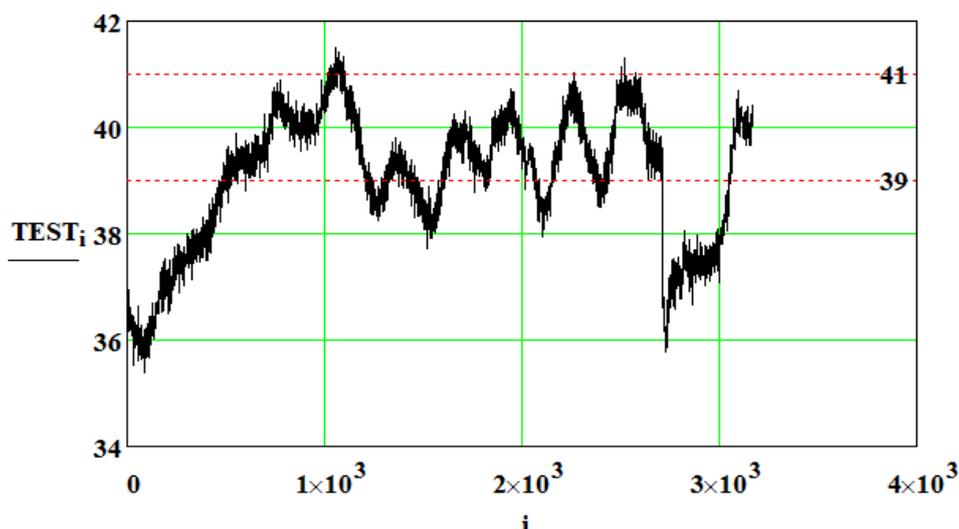


Рисунок 1 – Промышленный сигнал (архивная копия) [Industrial signal (archived copy)]

На данном периоде наблюдений фиксируется дестабилизация контролируемого показателя относительно эксплуатационного режима ( $36^{\circ}\text{C}$ ). Значение индикатора Хёрста  $H=0,865$  (получено по описанной методике) однозначно предсказывает восходящий тренд – грядущее превышение нормативного предела. По этому показателю фиксируем деградацию объекта. На рисунке 2 представлена «плоскость Хёрста». Здесь точки с координатами  $(\log(n/2) - \text{абсцисса}, \log(\frac{R(n)}{S(n)}) - \text{ордината})$  аппроксимируются прямой:

$$z(t) = 0.865 \times t + 0.262;$$

$$H=0.865.$$

На большом объёме экспериментального материала установлена высокая эффективность диагностики состояний оборудования АЭС с использованием показателя Хёрста.

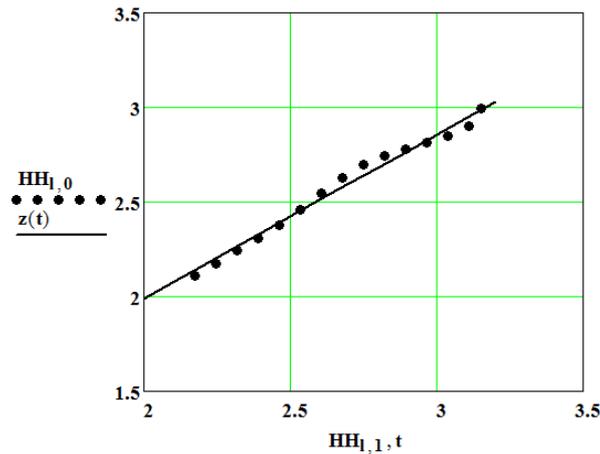


Рисунок 2 – «Плоскость Хёрста»  $HH_{1,1}(\log(n/2))$  – абсцисса,  $HH_{1,0}(\log \frac{R(n)}{S(n)})$  – ордината);  
 $z(t) = 0.865 * t + 0.262$  [“Hurst plane”  $HH_{1,1}(\log(n/2))$  - abscissa,  $HH_{1,0}(\log \frac{R(n)}{S(n)})$  ordinate);  
 $z(t) = 0.865 * t + 0.262$ ]

### Логистический анализ

Мгновенный наблюдаемый образ системы представляется точкой в многомерном нормативном пространстве. Вариабильность траектории изображаемой точки обусловлена: множественным случайным рассеянием с нулевыми средними значениями; следствиями переходных процессов режимного управления или технологических нарушений; формированием тренда к нормативным границам. В общем случае изменение наблюдаемого параметра происходит за некоторый случайный промежуток времени, со случайной скоростью. Основной функцией, характеризующей движение изображающей точки является закон распределения вероятности выхода параметра за нормативную границу. Величина этой вероятности может быть принята за мгновенное значение уровня дефектности системы. Деградация, в этом случае, представляется трендом в многомерном пространстве дефектности [8].

Этот тренд отражает деградацию системы по каждой измеряемой величине относительно установленных для неё нормативных ( $a_n$  – левая,  $b_n$  – правая) границ. Назовём его *показатель дефектности контролируемого определяющего технического параметра*:

$$\hat{d}_t = 1 - \hat{F}(b_n) + \hat{F}(a_n), \quad (1)$$

$$\text{где } \hat{F}_n(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x'_1; \\ \frac{k-1}{n}, & x'_{k-1} < x \leq x'_k \quad k=1,2,\dots,n; \\ 1, & x > x'_n, \end{cases} \quad \text{— эмпирическая функция распределения;}$$

$n$  – объём выборки,  $x'_k$  – элементы вариационного ряда измеренных значений.

Если доверительный интервал для математического ожидания наблюдаемой величины шириной  $6\hat{\sigma}$  покрывается нормативным, и их центры совпадают, то показатель дефектности  $\hat{d}_{\min}$  имеет минимальное значение, которое соответствует латентному уровню меры повреждений.

Система вложенных нормативных (контрольных) интервалов порождает семейство связанных оценок показателя дефектности. Показатель дефектности –

индикатор, позволяющий идентифицировать состояние оборудования сразу после ремонта, в процессе эксплуатации вести объективную оценку уровня деградации и осуществлять управление качеством профилактического обслуживания, не дожидаясь возникновения отказов или аварий.

В качестве предсказательной модели эволюции дефектности воспользуемся семейством логистических кривых. Основанием к этому принята следующая последовательность утверждений:

1. Скорость роста дефектности в системе при авариях (катастрофах) пропорциональна (коэффициент пропорциональности – число) накопленной дефектности – закон Мальтуса  $\dot{d} = k \times d$ ;
2. Скорость накопления дефектности на нормальных режимах эксплуатации пропорциональна накопленной дефектности (коэффициентом пропорциональности является спадающая функция дефектности) – мягкая модель Арнольда  $\dot{d} = k(d)d$  [9];
3. Интегральные функции распределения вероятности отказов принадлежат классу логистических функций [10];
4. Логистические кривые используют для моделирования эволюции сложных динамических систем путём перехода накапливаемых количественных изменений в качественные. Обобщённые логистические кривые применяют для отображения возмущающих модуляций поступательного тренда [11-14].

Логистическая трёхпараметрическая кривая представляется выражением:

$$d(t) = \frac{d_{max} \times d_0 \times \exp(r \times t)}{d_{max} + d_0 \times [\exp(r \times t) - 1]} \quad (2)$$

Здесь  $d_0$  – латентная дефектность;

$d_{max}$  – максимально допустимое значение дефектности;

$r$  – скорость накопления необратимых повреждений. Эта функция используется как средство аппроксимации эмпирической закономерности (1). Подобную форму имеет аналитическое решение мягкой модели Арнольда с выражением коэффициента в виде спадающей прямой:

$$k(d) = c_0 - c_1 d.$$

Для использования произвольных спадающих зависимостей  $k(d)$  соответствующее дифференциальное уравнение Арнольда приходится решать численно.

Производственные средства контроля основных технологических параметров накапливают объёмы информации постепенно. В этих обстоятельствах предлагаемые процедуры аппроксимации и экстраполяции, помимо обычно используемых линейных предсказателей, обеспечивают эффективное дополнение штатных систем промышленного мониторинга.

Прослеживалась эволюция дефектности сигнала рисунке 1 относительно контрольного уровня 39 на интервале наблюдений. На рисунке 3 представлена деградация объекта в форме эмпирической функции дефектности и её логистических аппроксимаций. На оси абсцисс номера пакетов накопленных измерений, по 300 значений в каждом.

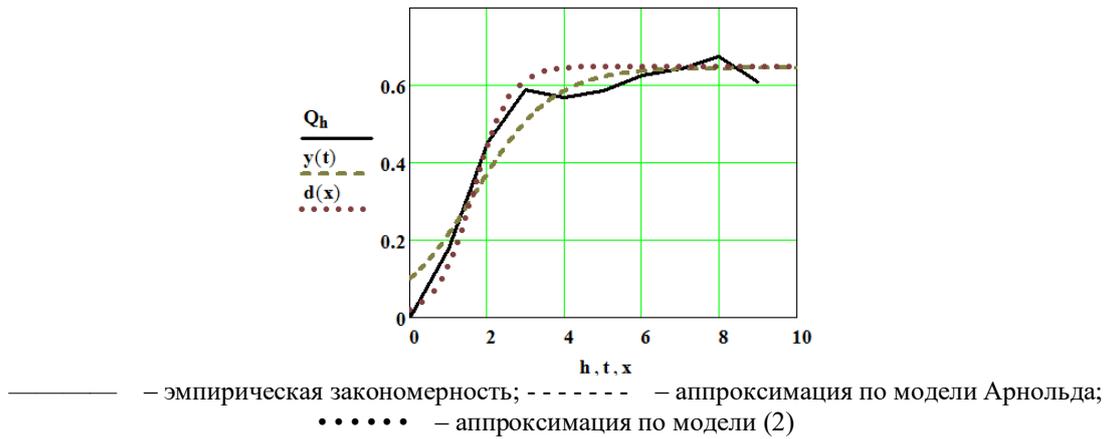


Рисунок 3 – Образ деградации (вероятность превышения параметром контрольного предела 39) объекта в форме логистических кривых [Degradation image (the probability of the parameter exceeding the control limit 39) of an object in the form of logistic curves]

Начиная с 900-ой точки измерения вероятность превышения контрольного уровня  $d \approx 0,6$  с тенденцией медленного роста. По этому критерию фиксируем деградацию объекта. Линейный экстраполятор позволяет предсказать момент превышения нормативного предела с вероятностью  $d \approx 1,0$ .

Возможно, наблюдаемый технологический параметр модулируют несколько разнородных факторов деградации, тогда порождается семейство логистических кривых, отражающих смену доминанты в механизмах деградации. На рисунке 4 приведён пример смены доминанты. В точках  $x = 7,3$  и  $x = 12,2$  огибающая семейства (на рисунке не показана) претерпевает «изломы» – скачки значений первой производной. Этот феномен образует собственный набор классификационных признаков. Логистический тренд каждого наблюдаемого независимого технологического параметра можно рассматривать как отдельное пространственное измерение. Ортогональное нормированное пространство, построенное на совокупности всех логистических трендов, можно рассматривать как пространство дефектности. Траектория точки в этом пространстве – геометрический образ деградации. Огибающая семейства является монотонно возрастающей кривой – это модель динамики кумулятивных величин. В каждый момент времени дефектность объекта образует уровень, относительно которого скорость дальнейшего роста пропорциональна достигнутому значению. Логистические кривые описывают рост с насыщением, означающим наличие предельно допустимого состояния деградации. При приближении к предельно допустимому уровню рост замедляется – объект должен быть выведен из эксплуатации.

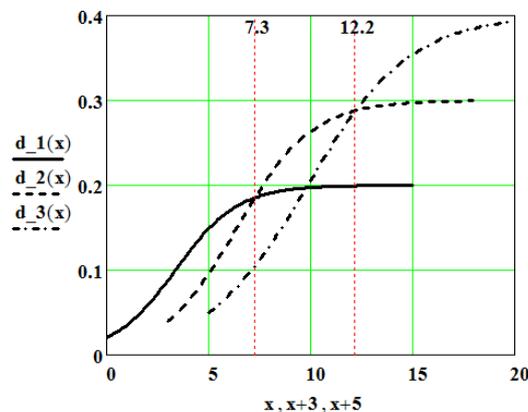


Рисунок 4 – Смена доминанты среди трёх совместно действующих факторов деградации [Change of dominant among three jointly acting degradation factors]

### Заключение

В статье на информационном материале, накапливаемом при мониторинге оборудования АЭС демонстрируется возможность построения промышленной системы предсказательной диагностики. Сотни технологических индикаторов, измеряемых в течение десятилетий, образуют колоссальный объём разноразмерных данных. Отображение этих данных в единичный, безразмерный гиперкуб через показатели Хёрста или показатели дефектности решает проблемы навигации в технологическом пространстве, идентификации предотказных состояний, позволяет по-новому сформулировать задачи техногенной безопасности и критерии её достижения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 26.260.004-91. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации = Procedural Guidelines – Prediction of Remaining Service Life of Equipment According to the Change in its Operational Parameters During Operation : утверждён в Концерн Химнефтемаш. – URL : <https://meganorm.ru/Data2/1/4294847/4294847460.htm> (дата обращения 09.09.2021).
2. ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016. Контроль состояния и диагностика машин : национальный стандарт Российской Федерации. Часть 1. Общее руководство = Condition monitoring and diagnostics of machines. Machine condition prognosis. Part 1. General guidelines : издание официальное : утверждён и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 ноября 2016 г. N 1770-ст : введен впервые : дата введения 2017-12-01 / подготовлен Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем». – Москва : Стандартинформ, 2017. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200142489> (дата обращения 09.09.2021).
3. Сысоев, Ю.С. и др. Прогнозирование состояний технологических объектов на основе текущего мониторинга значений их параметров с иллюстрацией на примере оборудования АЭС / Ю.С. Сысоев, А.А. Сальников, В.Г. Бекетов [и др.] // Измерительная техника, 2016. – № 4. – С. 3-7.
4. Мухаметзянов, И.З. Методические особенности применения стохастических показателей при анализе потоковых данных природных или технических процессов и объектов / И.З. Мухаметзянов, Р.А. Майский, М.Н. Янтудин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 5. – С. 446-492. – ISSN 1813-503X. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : <https://e.lanbook.com/journal/issue/298795> (дата обращения: 28.09.2021).
5. Калущ, Ю.А. Показатель Хёрста и его скрытые свойства / Ю.А. Калущ, В.М. Логинов. – Новосибирск : Сибирский журнал индустриальной математики, 2002. – Т. 5, № 4. – С. 29-37.
6. Кириченко, Л.О. Сравнительный анализ статистических оценок показателя Херста // Харьков : Вестник НТУ, 2010. – № 21 – С. 88-95.
7. Ляпунова, Е.А. и др. Исследование морфологии многомасштабных дефектных структур и локализации пластической деформации при пробивании мишеней из сплава А6061 / Е.А. Ляпунова, А.Н. Петрова, И.Г. Бродова [и др.] // Санкт-Петербург : Письма в журнал технической физики, 2012. – Т.38, №1. – С. 13-20.
8. Шпицер, В.Я. Моделирование деградации оборудования атомных станций / Новочеркасск : Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова // Известия вузов. Электромеханика, 2004. – 176 с.
9. Арнольд, В.И. Теория катастроф / А.В. Игоревиц. – Москва : Едиториал УРСС, 2007. – 136 с.
10. Острейковский, В.А. Теория надёжности / В.А. Острейковский. – Москва : Высшая школа, 2003. – 463 с.
11. Cyganek B., Socha K. Computationally efficient methods of approximations of the S-shape functions for image processing and computer graphics tasks. Image Processing & Communications, 2012, vol. 16, № 1-2, pp. 19-28.
12. Дроздюк, А.В. Логистическая кривая / А.В. Дроздюк. – Торонто : Choven, 2019. – 270 с.
13. Павлов, В.Д. Программный комплекс, методы моделирования и прогнозирования многокомпонентных моделей динамических рядов с использованием функции Рамсея : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

наук / В.Д. Павлов. – Самара : Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, 2009 г. – 20 с.

14. Гнеушев, А.Н. и др. Прямой метод оценки параметров двухсегментной кусочно-логистической кривой / А.Н. Гнеушев, А.А. Гурченков, И.И. Мороз // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2018 – № 1(118). – С. 31-48.

## REFERENCES

- [1] RD 26.260.004-91. Metodicheskie ukazaniya. Prognozirovaniye ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego texnicheskogo sostoyaniya pri e'kspluatatsii. [RD 26.260.004-91. Methodical Instructions. Procedural Guidelines – Prediction of Remaining Service Life of Equipment According to the Change in its Operational Parameters During Operation]. Utverzhdyon v Koncern Himneftemash [Introduced in Khimneftemash Concern]. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294847/4294847460.htm> (reference date 09.09.2021) (in Russian).
- [2] GOST R ISO 13381-1-2016. Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin : nacional'ny'j standart Rossijskoj Federacii. Chast' 1. Obshhee rukovodstvo [Condition Monitoring and Diagnostics of Machines. Machine Condition Prognosis. Part 1. General Guidelines]. Izdanie oficial'noe : utverzhdyon i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 24 noyabrya 2016 g. N 1770-st : vvedyon v pervye : data vvedeniya 2017-12-01 / podgotovlen Otkrytym akcionernym obshchestvom «Nauchno-issledovatel'skij centr kontrolya i diagnostiki tekhnicheskikh sistem».[Official edition. Approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of November 24, 2016 N 1770-st. Introduced for the first time. Date of introduction 2017/12/01. Prepared by the Open Joint Stock Company «Scientific Research Center for Control and Diagnostics Technical Systems»]. Moskva: Standartinform [Moscow: Standartinform]. 2017. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200142489> (reference date 09.09.2021) (in Russian).
- [3] Sy'soev Yu.S., Sal'nikov A.A., Beketov V.G. et al. Prognozirovaniye sostoyanij texnologicheskix ob'ektov na osnove tekushhego monitoringa znachenij ix parametrov s illyustraciej na primere oborudovaniya AE'S [The Prediction of the Technological Objects Conditions Based on the Current Monitoring of their Parameters' Values with an Illustration Using the Example of NPP Equipment]. Izmeritel'naya tekhnika [The Measuring Technology]. 2016. №4. P.3-7 (in Russian).
- [4] Muxametzyanov I.Z., Majskij R.A., Yantudin M.N. Metodicheskie osobennosti primeneniya stoxasticheskix pokazatelej pri analize potokovy'x dannyx prirodny'x ili texnicheskix processov i ob'ektov [The Methodological Features of Stochastic Indicators in the Analysis of Natural Streaming or Technical Processes and Facilities]. E'lektronny'j nauchny'j zhurnal «Neftegazovoe delo» [The electronic scientific journal «Oil and Gas Business»]. 2015. № 5. P.446-492. ISSN 1813-503X. URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/298795> (reference date: 28.09.2021) (in Russian).
- [5] Kalush Yu.A., Loginov V.M. Pokazatel' Xyorsta i ego skry'ty'e svojstva [The Hirst Indicator and its Hidden Properties]. Novosibirsk. Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki [The Siberian Journal of Industrial Mathematics]. 2002. №.4. Vol.5. P.29-37 (in Russian).
- [6] Kirichenko L.O. Sravnitel'ny'j analiz statisticheskix ocenok pokazatelya Xersta [The Comparative Analysis of Statistical Estimates of the Hurst Indicator]. Xar'kov. Vestnik NTU [The NTU Bulletin]. 2010. №21. P.88-95 (in Russian).
- [7] Lyapunova E.A., Petrova A.N., Brodova I.G. et al. Issledovanie morfologii mnogomasshtabny'x defektny'x struktur i lokalizacii plasticheskoy deformacii pri probivanii mishenej iz splava A6061 [The Investigation of the Morphology of Multiscale Defect Structures and Localization of Plastic Deformation During the Penetration of Targets from the A6061 Alloy]. Saint-Petersburg. Pis'ma v zhurnal texnicheskoy fiziki [Letters to the Journal of Technical Physics]. 2012. V.38. №1. P.13-20 (in Russian).
- [8] Shpicer V.Ya. Modelirovaniye degradacii oborudovaniya atomny'x stancij [The Modeling of the NPP Equipment Degradation]. Novocherkassk. Yuzhno-Rossijskij gosudarstvenny'j politexnicheskij universitet (NPI) im. M.I. Platova [Novocherkassk: South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platova]. Izvestiya vuzov. E'lektromexanika [University News. Electromechanics], 2004. 176 p. (in Russian).
- [9] Arnold V.I. Teoriya katastrof [Catastrophe theory]. Moskva: Editorial URSS [Moscow. Editorial URSS]. 2007. 136 p. (in Russian).
- [10] Ostreykovskiy V. A. Teoriya nadyozhnosti [The Theory of Reliability]. Moskva: Vysshaya shkola [Moscow. Higher School] 2003. 463 p. (in Russian).

- [11] Cyganek B., Socha K. Computationally efficient methods of approximations of the S-shape functions for image processing and computer graphics tasks. *Image Processing & Communications*. 2012. Vol.16. № 1-2. P.19-28 (in English).
- [12] Drozdyuk, A. V. *Logisticheskaya krivaya [The Logistic Curve]*. Toronto. Choven, 2019. 270 p. (in Russian).
- [13] Pavlov, V.D. Programmnny`j kompleks, metody` modelirovaniya i prognozirovaniya mnogokomponentny`x modelej dinamicheskix ryadov s ispol`zovaniem funkcii Ramseya [The Software Package, Methods of Modeling and forecasting Multicomponent Time Series Models Using the Ramsey Function]. Special`nost` 05.13.18 «Matematicheskoe modelirovanie, chislenny`e metody` i komplekсы` programm». Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk. [Specialty 05.13.18 "Mathematical Modeling, Numerical Methods and Program Complexes": thesis abstract for the PhD degree in Engineering]. Samara: Samarskij gosudarstvennyj aerokosmicheskij universitet imeni akademika S.P. Koroleva [Samara: Korolev Samara State Aerospace University]. 2009. 20 p. (in Russian).
- [14] Gneushev A.N., Gurchenkov A.A., Moroz I.I. Pryamoj metod ocenki parametrov dvusegmentnoj kusochno-logisticheskoy krivoj [Direct Method for Estimating the Parameters of a Two-segment Piecewise Logistic Curve]. *Vestnik MGTU im. N.E`. Baumana. Seriya «Priborostroenie» [Bulletin of Bauman MGTU. «Instrument Making» series]*. 2018. № 1(118). P.31-48 (in Russian).

## The Predictive Diagnosis Based on Hurst Indicator and Logistics Trends

V.Ya. Shpicer<sup>1</sup>, V.V. Krivin<sup>2</sup>, V.A. Tolstov<sup>3</sup>

*Volgodonsk Engineering-Technical Institute – Branch of NRNU «MEPhI»,  
Lenina street, 73/94, Volgodonsk, Russia 347360*

<sup>1</sup>*ORCID iD: 0000-0002-5051-5091*

*e-mail: shpits@mephi.ru*

<sup>2</sup>*ORCID iD: 0000-0003-0903-0786*

*WoS Researcher ID: E-2267-2018*

*e-mail: vkrivin@mephi.ru*

<sup>3</sup>*ORCID iD: 0000-0001-7144-5195*

*WoS Researcher ID: F-1032-2017*

*e-mail: v-tolstov-2017@mail.ru*

**Abstract** – The article presents the results of identifying pre-failure conditions. The results based on fractal analysis and nonparametric statistics. The NPP equipment units are highly reliable systems for long life cycle. These systems are characterized by slow graduating failures. This happens due to the accumulation of irreversible damage. Standard information measuring systems supply time series. They are traditionally processed by parametric methods. The processing of experimental data can be automated for industrial monitoring of NPP equipment parameters.

*Keywords:* diagnostics, prediction, controlled parameters, data processing, degradation, Hurst indicator, observation, monitoring, logistic methods, pre-failure conditions, standard intervals, probability distribution.