

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЫ ПО ДИНАМОГРАММЕ

*В.Б. Садов*

## DEFINITION OF DEFECTS OF EQUIPMENT OF OIL WELL ON DYNAMOMETER CARD

*V.B. Sadov*

Рассматривается задача анализа динамограммы с целью обнаружения дефектов скважинного оборудования. Приведен обзор разных методов диагностики скважинного оборудования по динамограмме. Дан простой алгоритм, позволяющий определять различные дефекты с возможностью реализации его в контроллере системы управления привода насосной установки.

*Ключевые слова:* динамограмма, диагностика.

In the article the task of dynamometer card analysis is considered with the purpose of detection of defects of the oil well equipment. The review of different methods of diagnostics of oil well equipment on dynamometer card is presented. The simple algorithm, which allows to detect various defects with an opportunity of its realization in the controller of the control system of pump unit drive, is given.

*Keywords:* dynamometer card, diagnostics.

### Введение

Значительная часть фонда нефтяных скважин оснащена скважинными штанговыми насосными установками. Условия эксплуатации глубинно-насосной установки требуют организации правильной ее эксплуатации и постоянного контроля. В настоящее время практически единственным методом контроля состояния глубинного насоса и скважинного оборудования является динамометрирование. Гораздо реже для этих целей используются ваттметрограммы или токограммы. Поэтому вопрос определения дефектов глубинного оборудования по динамограмме является актуальным. В настоящей статье ставится задача синтеза алгоритма определения дефектов скважины по динамограмме для реализации в контроллере системы управления насосной установки.

### Методы обработки динамограмм

Существует два класса методик диагностики работы скважинной штанговой насосной установки (СШНУ) по динамограмме: распознавание образов практических динамограмм, основанное на сравнении с эталоном, и определение неисправности исходя из физических законов получения динамограммы ненормальной работы насоса.

Для первого класса методик можно выделить несколько подходов к решению этой задачи:

- матричное представление практической динамограммы;
- анализ признаков Фурье, полученных из практической динамограммы;
- вычисление признаков на базе рядов, отличных от рядов Фурье;
- анализ отклонения практической динамограммы от эталонной;
- выделение релевантных точек на практической динамограмме.

*Пример обучаемой нейронной сети с матричным представлением практической динамограммы* приведен в [1]. Здесь практическая динамограмма переводится в матричную форму цифрового представления в бинарном коде с разрешением 14×8, как показано на рис. 1.

Далее на основе данных, полученных в результате указанного преобразования графического изображения, путем последовательной записи строк «слева направо – сверху вниз», формируется бинарный код динамограммы, представляющий собой вектор-строку из 112 элементов. Для динамограммы, показанной на рис. 1, этот вектор будет иметь значение:

---

Садов Виктор Борисович – канд. техн. наук, доцент кафедры систем управления, Южно-Уральский государственный университет; sv\_2005@inbox.ru

---

Sadov Viktor Borisovich – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of Control System Department of South Ural State University; sv\_2005@inbox.ru

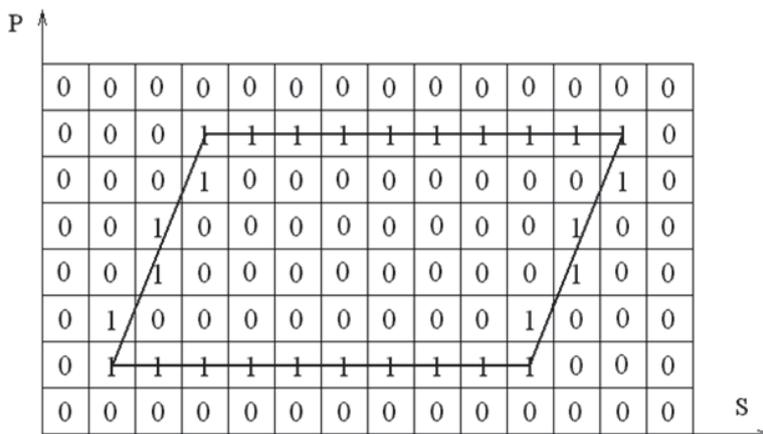


Рис. 1. Пример оцифровки динамограммы

$$din1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Для реализации задачи распознавания динамограмм выбрана двухслойная сеть прямого распространения, которая отличается простотой связей между нейронами. Параметры сети получают исходя из задачи распознавания необходимого числа динамограмм (в статье приведено 9 типов) и способа их цифрового представления (вектор-строка из 112 элементов). Сформулированные условия приводят к структуре, изображенной на рис. 2, содержащей 112 входных нейронов, 9 нейронов выходного слоя, во внутреннем слое на основе результатов вычислительных экспериментов предлагается использовать 26 нейронов. В качестве функций активации применена смещенная в положительную область сигмоидальная (логистическая) функция.

Обучение сети проводится итеративным градиентным методом с помощью комбинированного алгоритма обратного распространения ошибки с возмущением и адаптацией параметра скорости настройки.

Нейросетевой подход использует также и методика Оганезова [2]. Она была протестирована в Тбилиском государственном университете и в отличие от аналогичных методик выделяется высокой скоростью и точностью классификации образов. Динамограмма представляется в виде бинарной матрицы. Практическая динамограмма разбивается на  $M \times N$  ячеек. Ячейка, которая содержит в себе часть динамограммы, обозначается как единица, а пустая ячейка – как 0. Для диагностики неисправности используется нейронная сеть, обученная на нескольких эталонных динамограммах, которые также представлены в матричном виде. Обучение производится по нескольким динамограммам, соответствующим одной и той же неисправности. На каждую неисправность строится суммарная матрица, полученная суммированием значений в соответствующих ячейках. В результате путем деления каждого значения в суммарной матрице на количество эталонных образов получается вероятностная матрица. Для распознавания

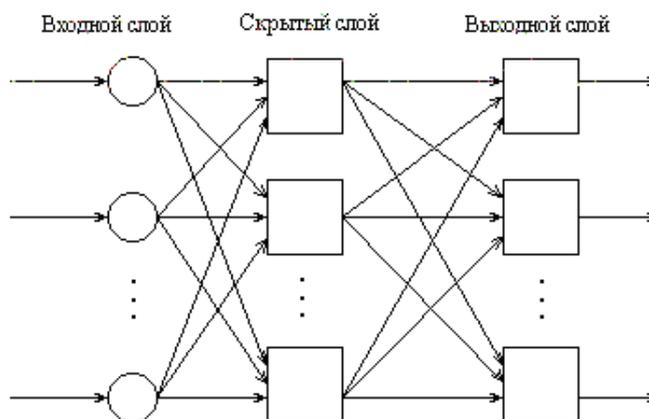


Рис. 2. Структура двухслойной прямонаправленной нейронной сети для анализа динамограмм

фактической динамограммы на каждую неисправность строятся так называемые конгруэнтные матрицы. Они получаются в результате операции умножения значений точек фактической матрицы на соответствующие по позиции значения точек из вероятностных матриц. После этого строятся диверсивные матрицы. Они получаются следующим образом: если разница между значением точки из матрицы фактической динамограммы и соответствующим значением точки из вероятностной матрицы равно 1, то в диверсивной матрице соответствующая по позиции точка принимает значение, равное 1, в противном случае – записывается значение, равное 0. Далее в результате вычитания значений точек вероятностных матриц с соответствующими по позиции значениями точек из конгруэнтных матриц создаются пассивные матрицы. Наконец, на последнем этапе строятся симбиозные матрицы. Они получаются в результате перенесения значений точек, не равных 0, из конгруэнтных, диверсивных и пассивных матриц в одну общую матрицу. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3 [2].

Определение неисправности основано на гипотезе: чем больше конгруэнтных и нулевых точек и меньше диверсивных и пассивных точек в симбиозной матрице, тем ближе изображение матрицы рецепторов к искомой сумматорной матрице образа, то есть к реальному изображению. Другими словами, из всех симбиозных матриц неисправности выбирается матрица с наибольшим количеством конгруэнтных и нулевых точек.

Данная методика предполагает получение матрицы рецепторов  $M \times N$  из практической динамограммы. Можно использовать разбиение области динамограммы, например, на 30 строк и 30 столбцов.

Ввиду того, что значения перемещения и нагрузки на различных динамограммах могут варьировать в очень широких диапазонах, для корректного использования метода каждая динамограмма нормируется. Все тестируемые динамограммы представляют собой дискретный набор точек «пе-

ремещение – нагрузка». При переводе этих динамограмм в матричное представление возникает «разорванный» образ, то есть образ, содержащий пустоты, что оказывает влияние на результат распознавания. Исходя из этого, одним из этапов подготовки данных должна быть работа по аппроксимации точек на матрице рецепторов. Новое матричное представление динамограммы лишено разрывов и представляет собой замкнутый контур.

Методика Алиева – Тер-Хачатурова основана на аппроксимации сигналов динамограммы усеченным рядом Фурье, вычислении и классификации признаков Фурье. Алгоритмы сравнения с эталоном основаны на логических признаках описания формы динамограммы. В процессе принятия решения о принадлежности динамограммы к определенному классу полученный набор признаков динамограммы сравнивается с эталонными кодовыми наборами классов, в том числе до полного их совпадения. Проблемы при использовании этой методики связаны с тем, что определенные классы неисправностей СШНУ, такие как утечки в клапанах, откачка с газом и другие нельзя назвать «четкими» классами. Кроме того, формы динамограмм, относящиеся к одному классу состояния оборудования, зависят от большого числа параметров станка-качалки, основные из которых – глубина спуска насоса, число качаний, компоновки штанговой колонны, свойства добываемой продукции и др. В этих условиях качество любого алгоритма распознавания определяется возможностью разделить классы неисправностей независимо от указанных факторов. Сегодня существует много алгоритмов распознавания образов, однако отсутствует единый подход к выбору классификационных признаков. Для реализации и тестирования часто используется методика, предложенная Т.М. Алиевым и А.А. Тер-Хачатуровым [3]. Данная методика полностью раскрывает алгоритмы диагностики динамограмм с помощью признаков Фурье. Она содержит рекомендации по преобразованию признаков пространства с целью минимизации внутриклассового и максимизации межклассовых

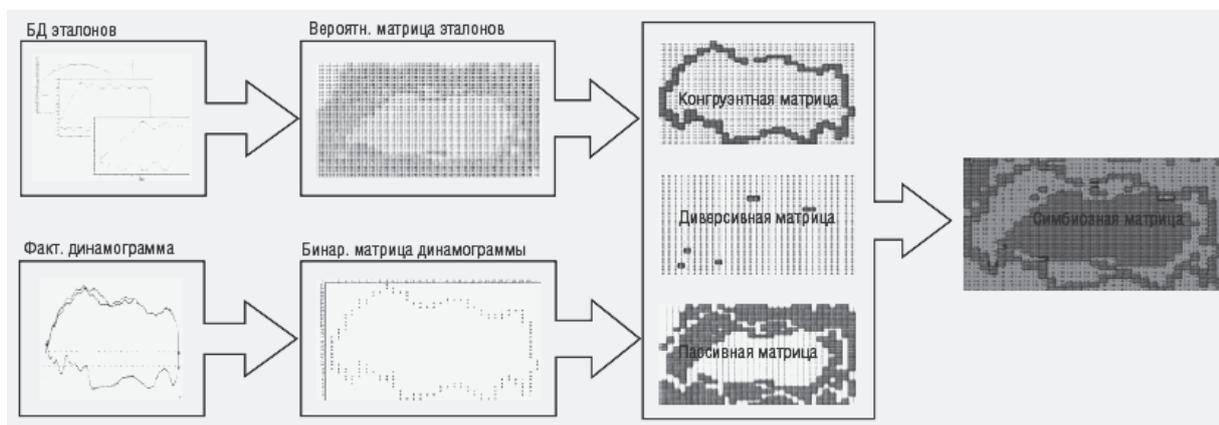


Рис. 3. Блок-схема алгоритма Оганезова

расстояний. Данный метод предполагает обучение по нескольким динамограммам для каждой неисправности. Для каждого класса неисправностей строится эталонный вектор, координатами которого является математическое ожидание данного признака по всем образам класса. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 4 [2].

Одной из основных проблем, требующих решения в ходе реализации метода, является проблема выбора количества признаков Фурье. Авторы методики не предлагают какого-то оптимального числа признаков, поэтому их число подбирается экспертно. В ходе тестирования метода на одном из предприятий рассматривалось от 80 до 500 признаков [2]. Другой проблемой является отсутствие в методике способа представления комплексного числа, каким является признак Фурье, а именно: экспоненциальная форма, алгебраическая форма, отдельно амплитуда или частота. Адаптация метода заключается в том числе и в выборе представления. В [2] был выбран вектор, составленный из компонентов алгебраического представления признаков Фурье. Важным элементом адаптации послужило использование плунжерных динамограмм для диагностики, в результате чего процесс диагностики состоял их двух этапов: выделения плунжерной динамограммы и непосредственно диагностики.

В качестве примера использования рядов, отличных от Фурье, можно привести методику [4, 5], где для определения параметров скважин данные

динамограммы представлялись в форме взвешенного разложения. Далее полученные коэффициенты анализировались, используя нейросетевой подход.

Методика GRID PATTERN относится к классу методик, базирующихся на сравнении практической динамограммы и эталонной. Она основана на элементарном алгоритме наложения фактической динамограммы на эталон и последующего вычисления значений отклонения. Соответственно чем меньше отклонение фактической динамограммы от эталона неисправности, тем больше вероятность наличия данной неисправности в СШНУ. В методиках используется как обыкновенное вычисление общей дельты отклонения, так и более развернутый подход. Практическая динамограмма равномерно делится на ячейки. Тем ячейкам, которые содержат часть динамограммы или расположены внутри границы динамограммы, присваивается значение 1, в ином случае – 0. Эталонная динамограмма строится по следующему принципу: ячейкам, содержащим кусок динамограммы, присваивается значение 1; ячейкам, находящимся внутри кривой, присваиваются значения 2, 3, ..., N в зависимости от удаленности ячейки от границы; ячейкам, находящимся вне границы, – значения 0, -1, ..., -M в зависимости от удаленности ячейки от границы. Значения N и M определяются экспертно, исходя из размерности матрицы. Метод диагностики основан на вычислении величины C (A, B). Она вычисляется для всех эталонов, и тот эталон, где значение C (A, B) будет минимальным, и покажет ис-

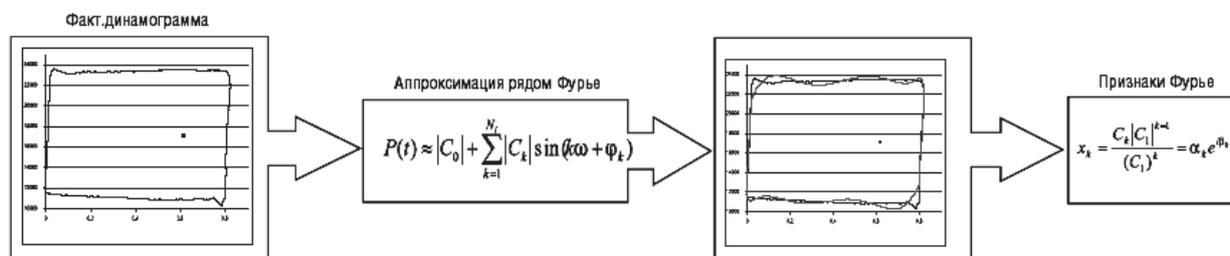


Рис. 4. Блок-схема алгоритма Алиева – Тер-Хачатурова

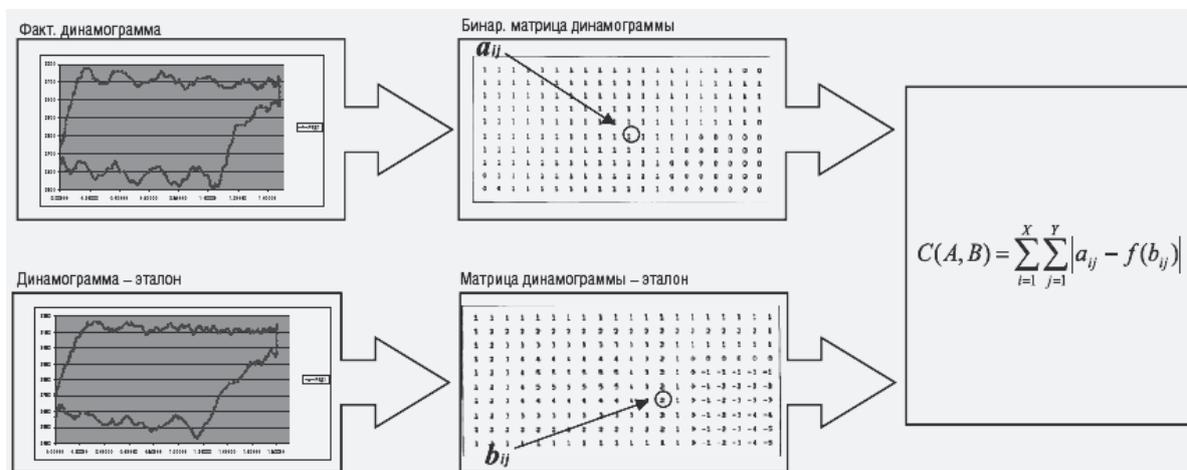


Рис. 5. Блок-схема метода GRID PATTERN

комуую неисправность. Несмотря на простоту, этот метод показывает хорошие результаты. Динамограммы обычно нормируются. В качестве параметра для матрицы эталонов, определяющего удаленность ячейки матрицы от контура, можно рассматривать значение кратчайшего расстояния до контура. Матричное представление динамограммы предполагает, что градация цвета определяет удаленность ячейки от контура. Блок-схема метода представлена на рис. 5 [2].

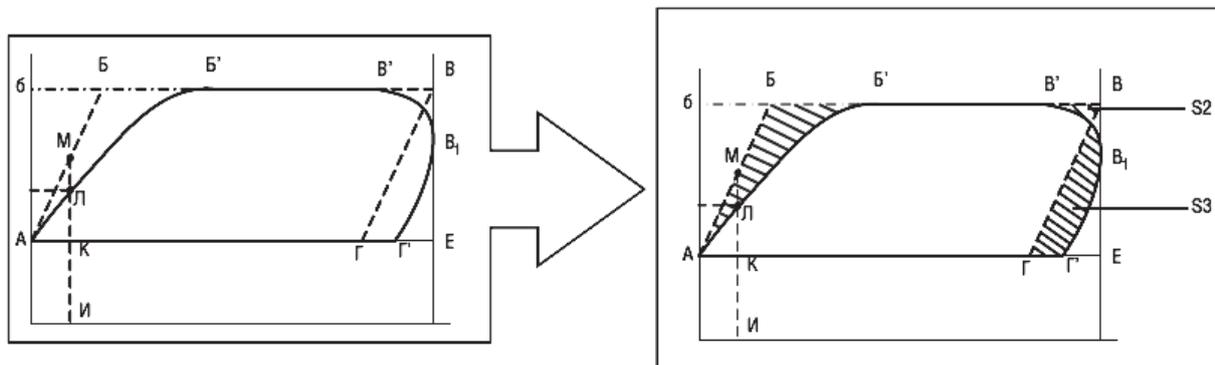
Адаптация метода заключается в нормировании образа динамограммы, увеличении размерности матрицы и более точном расчете расстояния от ячейки матрицы эталонов до контура динамограммы. Интересно отметить, что в искомом алгоритме предполагается сравнение предъявляемой динамограммы с фиксированным набором эталонных динамограмм. В [2], например, количество эталонных динамограмм было выбрано равным 153.

При использовании нейросетевого подхода в процессе сравнения с эталоном одним из основных возникает вопрос о необходимом количестве динамограмм с различными вариантами неисправностей и значений эталонов. Например, для методики, приведенной в [4, 5], для достижения достоверности классификации динамограммы с точностью 70 % и более количество обработанных динамограмм превышало 1200 (в эксперименте было задействовано 483 насосные установки); для методик, приведенных в [2], было использовано от 150 до 200 тестовых динамограмм и анализировалось до 500 признаков. Понятно, что хранение такой информации требует большого количества памяти и время обработки становится достаточно велико даже для персональных компьютеров. Использование же подобных алгоритмов во встраиваемых системах на базе контроллеров вообще проблематично.

*Методика Белова – Гилаева* относится к классу методик, анализирующих отклонения от теоретической динамограммы. Он использует выделенные на практической динамограмме релевантные точки. Метод предполагает определение неисправности, исходя из физических законов получения динамограммы ненормальной работы насоса.

Он основан на визуальном сравнении фактической и идеальной (теоретической) динамограмм. Любое существенное отклонение фактической динамограммы от теоретической свидетельствует о ненормальной работе насоса. Способы диагностики работы СШНУ путем визуального сравнения формы кривой динамограммы детально описаны в работах И.Г. Белова [6] и Г.Г. Гилаева. В основу алгоритма положено руководство И.Г. Белова по расшифровке динамограмм. Посредством этой методики определяются семь наиболее характерных точек динамограмм, по значениям которых согласно предложенным критериям задаются последовательности арифметических операций и сравнений, позволяющие делать конкретное заключение о работе насоса. Координаты характерных точек определяются при совмещении теоретической динамограммы с практической динамограммой. Вместе с тем в этом описании не приводятся формализованные признаки, которые можно было бы соотнести с той или иной неисправностью. В качестве примера можно рассмотреть диагностику утечки жидкости в нагнетательной части насоса. Среди признаков динамограммы, по которым можно обнаружить утечку, следует назвать: отображение процесса восприятия нагрузки наклонной кривой, имеющей меньший угол наклона к горизонтали по сравнению с линией восприятия нагрузки при нормальной работе насоса; острое очертание левого нижнего угла динамограммы, закругление ее правого верхнего угла рис. 6 (для динамических динамограмм этот признак может отсутствовать).

Кроме того, на утечку обычно указывают большая кривизна линии снятия нагрузки по сравнению с линией восприятия нагрузок, меньшая интенсивность колебаний нагрузки при ходе плунжера вверх по сравнению с интенсивностью колебаний нагрузки при ходе вниз. Данная методика изначально не содержала формализованных признаков. Можно решить задачу их формализации (получение численных величин, характеризующих каждый признак на каждую неисправность), а также их последующей классификации. После этого анализ динамограммы сводится к по-



**Рис. 6. Диагностика утечки жидкости в нагнетательной части насоса**

строению экспертной системы, где все формализованные признаки указывают на наличие определенной неисправности. Данная методика, как правило, требует данных по параметрам скважины.

К типу методик, анализирующих поведение динамограммы в/между релевантными точками, относится и описанная в [7], при котором вся динамограмма делится на 24 участка и рассматриваются симптомы на каждом участке (всего было выделено 16 характерных динамограмм). Подобные методики использованы при создании таких программ анализа динамограмм, как DINAMOGRAPH [8, 9] разработки НПП «Грант».

Второй класс методик описывает теоретические основы получения практической динамограммы какой-либо неисправности, но при этом не дает формализованных признаков той или иной неисправности. Иными словами, в этой методике описано, каким образом получается динамограмма неисправности, но нет математических подходов описания ее признаков [10, 11].

#### Обоснование подхода к анализу динамограмм в контроллере системы управления приводом ШНУ

Практически все методы анализа динамограмм рассматривают случай, когда диагностика производится либо на персональных ЭВМ, расположенных в цеховых помещениях, либо при диагностике требуется вводить большое количество данных по скважине и добываемому оборудованию (глубина погружения насоса, уровень нефти, ее вязкость и плотность, тип и характеристики погружного насоса, текущее количество двойных ходов и величину хода полированного штока, характеристики колонны штанг и т. п.). При этом эти характеристики могут непрерывно меняться в достаточно широких пределах. Например, в процессе нефтедобычи резко меняется величина текущего уровня жидкости в скважине, ее характеристики по плотности и вязкости, давления в трубах, со временем серьезно изменяются характеристики погружного насоса. Поэтому применение алгоритмов, использующих динамическую модель скважина – насосная установка, в контроллере системы управления приводом насосной установки является спорным. Рассмотрим случай диагностирования

непосредственно на скважине. Алгоритмы диагностики здесь должны удовлетворять следующим требованиям:

- не должны требовать хранения больших массивов информации по параметрам различных типов характерных динамограмм;
- быть просты в реализации, не предъявлять больших требований к быстродействию применяемых в системах управления насосных установок контроллеров;
- не должны использовать (или использовать с малым влиянием) динамически изменяющиеся параметры насосной установки и скважины;
- должны позволять менять настройку параметров диагностики, чтобы на скважине при необходимости можно было изменить эти параметры с целью получения наилучших результатов анализа динамограмм.

Исходя из этих требований, в качестве алгоритма желательно использовать одну из методик, анализирующих поведение динамограммы в/между релевантными точками. Подобный алгоритм, реализованный в пакете программ DINAMOGRAPH, приведен в [9]. Можно использовать поведение динамограммы в/между точками перегиба ее характеристики. В этом случае алгоритмы определения дефектов скважины становятся достаточно простыми. Определить точки перегиба динамограммы можно, используя способ, описанный в [12].

#### Алгоритмы выделения дефектов по динамограмме

Рассмотрим простейшие случаи, когда на участках движения вверх и вниз определилось по две или максимум три точки перегиба (рис. 7). Алгоритмы с использованием большего количества точек перегиба также легко формализуются.

На рисунке цифрами помечены участки движения полированного штока вверх и вниз. Вообще, на динамограмме можно выделить несколько участков, например, участок I делится на участок возрастания нагрузки на полированном штоке (Ia) и участок относительной стабильности этой нагрузки (Ib). То же самое происходит и на втором участке (при движении штока вниз).

Будем рассматривать только дефекты, выделенные в статье автора «Моделирование динамо-

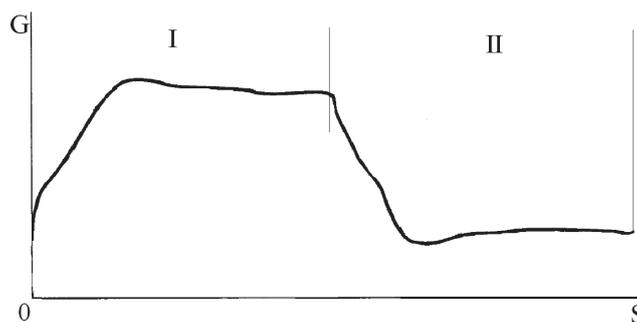


Рис. 7. Типовая динамограмма развернутая

грамм с различными дефектами оборудования нефтяной скважины» в настоящем Вестнике.

*Обрыв колонны штанг*

Это самый простой определяемый по динамограмме дефект. В этом случае нужно просто определить средние значения усилий при движении полированного штока вверх и вниз и вычислить их разницу. Если это значение меньше, чем заданное (его заранее задать, исходя из данных скважины, насоса и привода), то это говорит о наличии данного дефекта. Но, если посмотреть на вид динамограммы с дефектом типа «недостаточный приток жидкости в скважину», то можно убедиться, что в данном случае разница средних усилий при движении вверх и вниз тоже невелика. Однако при данном дефекте разница между максимальным и минимальным усилиями за двойной ход практически не меняется относительно нормальной динамограммы. Поэтому можно предложить следующий алгоритм определения данного дефекта:

– вычисляются максимальные и минимальные усилия динамограммы. Если их разница больше какой-то уставки  $a$ , то гипотеза о дефекте типа «обрыв колонны штанг» отвергается. В противном случае идем на следующий пункт алгоритма;

– вычисляются по динамограмме средние усилия на полированном штоке при движении вверх и вниз. Если разница меньше какой-то уставки  $b$ , то гипотеза о дефекте типа «обрыв колонны штанг» принимается.

Величины уставок  $a$  и  $b$  могут отличаться друга. При этом  $a > b$ .

Данный алгоритм выделения дефекта типа «обрыв колонны штанг» дает практически стопроцентную вероятность его правильного определения.

*«Запарафинивание» скважины*

В этом случае наблюдается либо отсутствие участков при движении штока вверх или вниз, или участки  $Ia$  и  $IIa$  сильно затянуты с начала движения вверх и вниз. При этом не наблюдается сильной асимметрии размеров участков  $Ia$  и  $IIa$ . Также, для четкой идентификации данного дефекта, следует учесть, что в точках перелома здесь не наблюдается перерегулирования процесса изменения нагрузки на полированном штоке. Поэтому можно предложить следующий алгоритм определения данного дефекта:

– если на участках  $I$  и  $II$  не наблюдается точек перегиба, то гипотеза о дефекте типа «запарафинивание скважины» принимается. Остальные пункты алгоритма не проверяются;

– если величина участка  $Ia$  меньше заданной уставки (в процентах от величины участка  $I$ ), то гипотеза о дефекте типа «запарафинивание скважины» отвергается;

– если величина участка  $IIa$  меньше заданной уставки (в процентах от величины участка  $II$ ), то гипотеза о дефекте типа «запарафинивание скважины» отвергается;

– если величина  $|Ia-IIa|$  больше уставки (в про-

центах от величин участков  $I$  и  $II$ ), то гипотеза о дефекте типа «запарафинивание скважины» отвергается;

– если величина нагрузки на штоке в точке перехода участков  $Ia$  и  $Ib$  больше величины  $\delta G_{\max}$ , где  $G_{\max}$  – максимальная нагрузка на штоке для данной динамограммы, а  $\delta \in [0;1]$ , то гипотеза о дефекте типа «запарафинивание скважины» отвергается;

– если величина нагрузки на штоке в точке перехода участков  $IIa$  и  $IIb$  меньше величины  $\delta G_{\min}$ , где  $G_{\min}$  – минимальная нагрузка на штоке для данной динамограммы, а  $\delta \in [0;1]$ , то гипотеза о дефекте типа «запарафинивание скважины» отвергается;

– если гипотеза о дефекте типа «запарафинивание скважины» не была отвергнута предыдущими пунктами алгоритма, то она принимается.

*Недостаточный приток жидкости (продукции) в скважину (влияние газа)*

Здесь можно рассмотреть два варианта.

1. Вид развернутой динамограммы является обычным, то есть содержит четыре точки перегиба характеристики. Наблюдается также смещение точки перегиба характеристики динамограммы, характерное для точки стыковки участков  $I$  и  $II$ , на участок  $II$ . Также видно, что в этой точке нагрузка не больше, чем в конце участка  $I$ . Можно предложить следующий алгоритм определения данного дефекта:

– если в третьей точке перегиба характеристики динамограммы нагрузка больше, чем в точке конца участка  $I$ , то гипотеза о дефекте типа «Недостаточный приток жидкости в скважину» отвергается. Остальные пункты алгоритма не проверяются;

– если разница между абсциссой третьей точки перегиба характеристики динамограммы и абсциссой точки стыковки участков  $I$  и  $II$  больше величины  $\delta S_{\max}$ , где  $S_{\max}$  – величина хода штока, а  $\delta \in [0;1]$ , то гипотеза о дефекте типа «Недостаточный приток жидкости в скважину» принимается, в противном случае отвергается.

2. Вид развернутой динамограммы не является обычным, и содержит две точки перегиба на участке  $I$  и три точки перегиба на участке  $II$ . Причем в четвертой точке перегиба усилие больше, чем в пятой, а участок между точками 3 и 4 является заметным. Можно предложить следующий алгоритм определения данного дефекта:

– если в пятой точке перегиба характеристики динамограммы нагрузка больше, чем в четвертой, то гипотеза о дефекте типа «Недостаточный приток жидкости в скважину» отвергается. Остальные пункты алгоритма не проверяются;

– если разница между абсциссой четвертой точки перегиба характеристики динамограммы и абсциссой точки стыковки участков  $I$  и  $II$  (третьей

точкой перегиба) больше величины  $\delta S_{\max}$ , где  $S_{\max}$  – величина хода штока, а  $\delta \in [0;1]$ , то гипотеза о дефекте типа «Недостаточный приток жидкости в скважину» принимается, в противном случае отвергается.

#### *Утечка в нагнетательной части насоса*

В этом случае вид развернутой динамограммы является обычным, то есть содержит четыре точки перегиба характеристики. Первая точка перегиба близка к точке начала I участка, а третья точка перегиба близка к точке конца I участка динамограммы. Величина участка Ia значительно превышает величину IIa. Алгоритм определения данного дефекта будет выглядеть следующим образом:

– если величина участка Ia меньше участка IIa, то гипотеза «Утечка в нагнетательной части насоса» отвергается;

– если величина участка Ia по величине больше участка IIa и в относительных единицах больше установленной величины  $\delta \in [0;1]$ , то гипотеза о дефекте типа «Утечка в нагнетательной части насоса» принимается, в противном случае отвергается.

#### *Утечка в приемной части насоса*

В этом случае вид развернутой динамограммы является обычным, то есть содержит четыре точки перегиба характеристики. Первая точка перегиба близка к точке начала I участка, а третья точка – к точке конца I участка динамограммы. Величина участка IIa значительно превышает величину Ia. Алгоритм определения данного дефекта будет выглядеть следующим образом:

– если величина участка IIa меньше участка Ia, то гипотеза «Утечка в приемной части насоса» отвергается;

– если величина участка IIa по величине больше участка Ia и в относительных единицах больше установленной величины  $\delta \in [0;1]$ , то гипотеза о дефекте типа «Утечка в приемной части насоса» принимается, в противном случае отвергается.

#### *Выход плунжера из корпуса насоса*

В этом случае динамограмма имеет петлю при движении вверх. Но, если посмотреть на развернутую динамограмму, можно заметить, что при движении вверх, не доходя до верхней точки движения штока, имеется еще одна точка перегиба. Поэтому можно сформулировать алгоритм определения данного дефекта:

– если при движении вверх мы имеем меньше трех точек перегиба (считая и точку начала движения вверх), то гипотеза типа «Выход плунжера из корпуса насоса» отвергается;

– если величина интервала от третьей точки перегиба до точки конца I участка в относительных единицах от величины I участка больше установленного порога  $\delta \in [0;1]$ , то гипотеза о дефекте типа «Выход плунжера из корпуса насоса» принимается, в противном случае отвергается.

#### *Заедание плунжера сверху*

Здесь динамограмма имеет петлю при движении вверх. Имеет смысл этот дефект определять путем простого анализа поведения точек динамограммы. Алгоритм определения данного дефекта будет иметь вид:

– просматриваем все точки динамограммы при движении вверх, начиная с какой-то точки, в которой перемещение штока больше, чем  $\alpha A$ , где  $A$  – величина I участка, а  $\alpha \in [0;1]$ . Считаем количество точек, где нагрузка меньше, чем в точке с этим же значением перемещения штока, но при движении вниз;

– если полученное количество точек превышает заданный предел (его можно задавать в процентах от общего количества точек динамограммы при движении вверх), то гипотеза о дефекте типа «Заедание плунжера сверху» принимается, в противном случае отвергается.

#### *Заедание плунжера внизу*

Здесь динамограмма имеет петлю при движении вниз. Имеет смысл этот дефект определять путем простого анализа поведения точек динамограммы. Алгоритм определения данного дефекта будет иметь вид:

– просматриваем все точки динамограммы при движении вниз, начиная с какой-то точки, в которой перемещение штока меньше, чем  $\alpha A$ , где  $A$  – величина II участка, а  $\alpha \in [0;1]$ . Считаем количество точек, где нагрузка больше, чем в точке с этим же значением перемещения штока, но при движении вверх;

– если полученное количество точек превышает заданный предел (его можно задавать в процентах от общего количества точек динамограммы при движении вниз), то гипотеза о дефекте типа «Заедание плунжера внизу» принимается, в противном случае отвергается.

### **Проверка синтезированных алгоритмов на модельных примерах**

Автором была разработана программа, реализующая описанные алгоритмы выделения дефектов. В качестве входных динамограмм были использованы полученные с помощью программы, описанной в статье автора «Моделирование динамограмм с различными дефектами оборудования нефтяной скважины» в настоящем Вестнике. Определение некоторых видов дефектов с помощью разработанной программы показано на рис. 8–10, где в окне справа сверху приведены использованные параметры модели при построении динамограммы, а справа снизу – результат анализа в программе. При этом исходные данные генерировались, исходя из возможного получения реальной динамограммы, то есть использовалось ограниченное количество точек динамограммы, а усилие бралось квантованным по уровню.

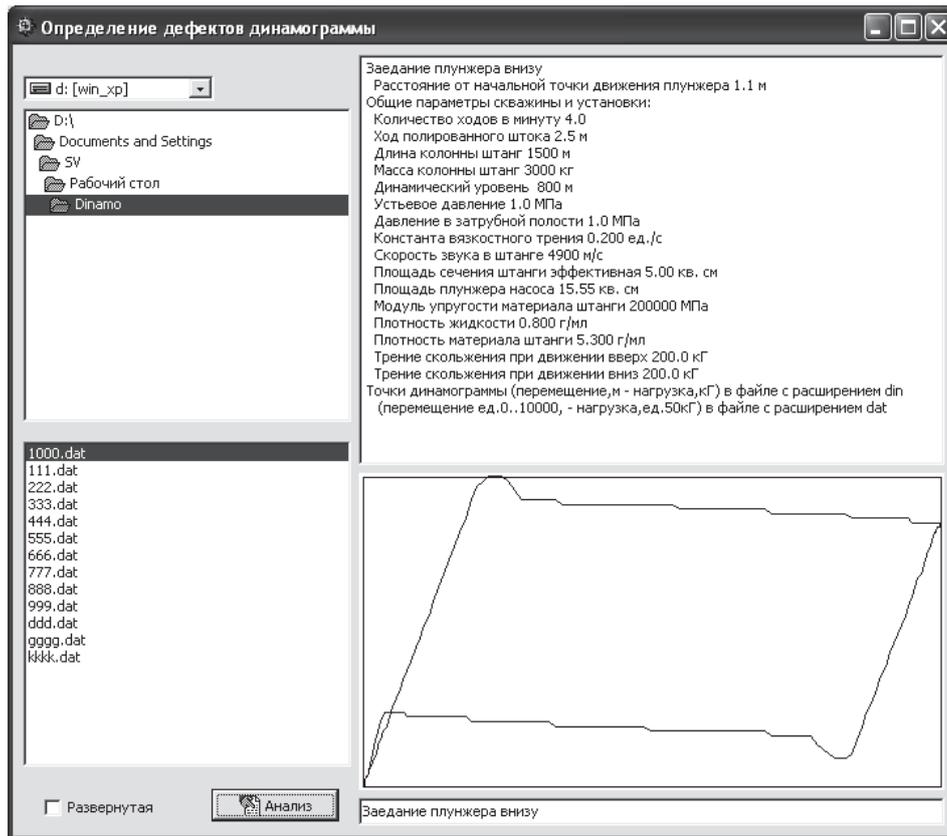


Рис. 8. Задание плунжера вниз

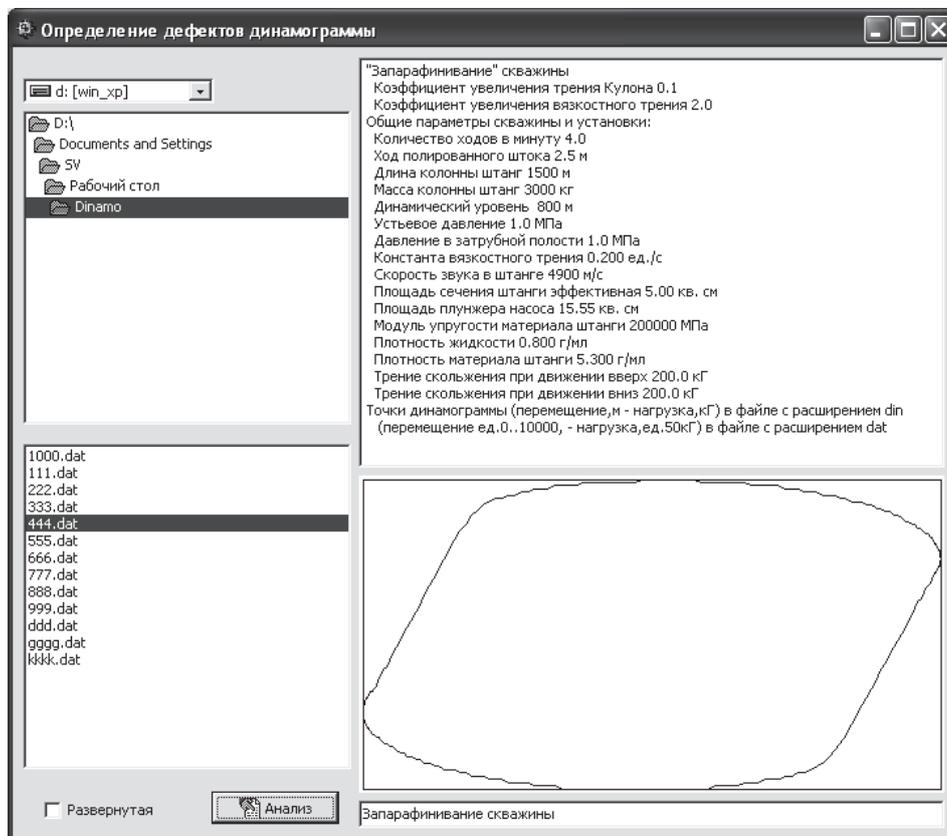


Рис. 9. «Запарафинивание» скважины

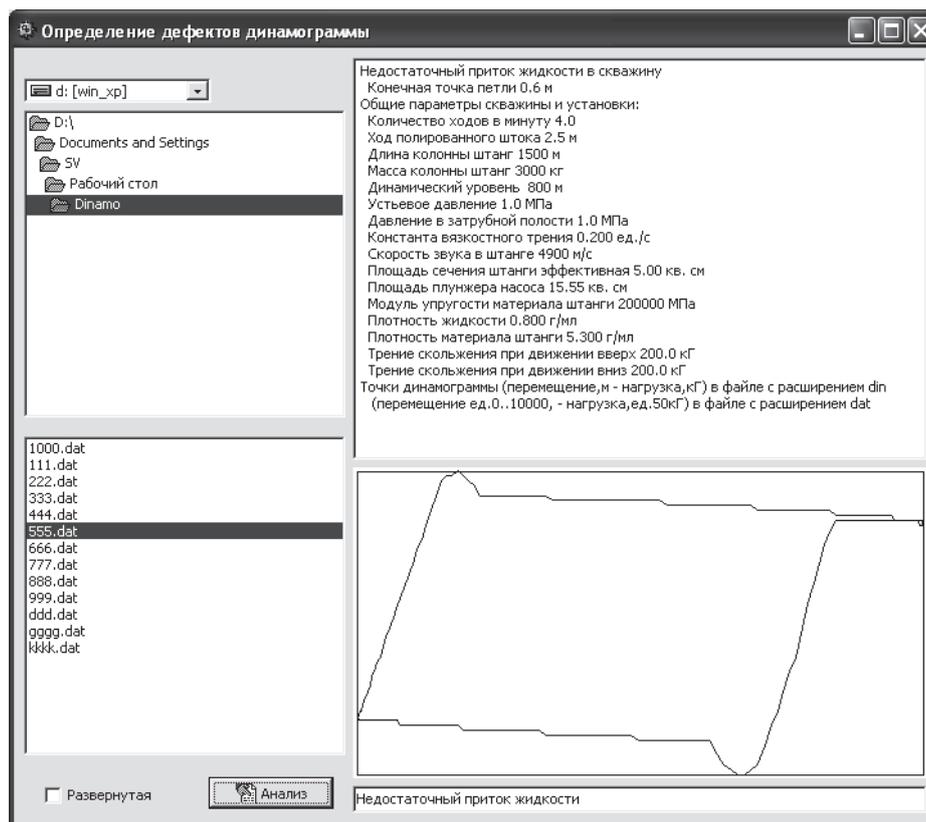


Рис. 10. Недостаточный приток жидкости в скважину

### Выводы

Приведенный алгоритм выявления дефектов скважины и погружного оборудования является принципиально новым, отличным, например, от описанного в [9], где динамограмма делится на четко фиксированное число участков и задаются критерии оценки параметров на каждом участке. В синтезированной же методике количество участков определяется числом точек перегиба, которых даже для волнообразной динамограммы не бывает более десяти, и на основании значений усилий в точках перегиба и между ними делается вывод о виде дефекта. При этом можно использовать и подход, описанный в [9], где высчитывается общий критерий с весовыми коэффициентами по каждому из признаков.

Синтезированный алгоритм анализа данных динамограммы позволяет получать выводы по типу динамограммы, не требует большого количества параметров для своей работы и легко реализуется на базе современных микроконтроллеров. Все это позволяет утверждать, что задача, поставленная во введении данной статьи, может быть решена при использовании описанного подхода. Этот метод может быть также использован в случае получения ваттметрограммы или токограммы.

### Литература

1. Зюзев, А.М. Система диагностики штанговой глубинно-насосной установки на основе ней-

ронной сети / А.М. Зюзев, А.В. Костылев // «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB»: тр. Всерос. науч. конф. – М.: ИПУ РАН, 2004. – С. 1266–1272.

2. Мансафов, Р.Ю. Новый подход к диагностике работы УСШН по динамограмме / Р.Ю. Мансафов // Инженерная практика. – 2010. – № 9. – С. 82–89.

3. Алиев, Т.М. Автоматический контроль и диагностика скважинных штанговых насосных установок / Т.М. Алиев, А.А. Тер-Хачатуров. – М.: Недра, 1988. – 232 с.

4. Тагирова, К.Ф. Автоматизация управления технологическим процессом добычи нефти из малодобитных скважин на основе динамических моделей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / К.Ф. Тагирова. – Уфа, 2008. – 32 с.

5. Дунаев, И.В. Диагностика и контроль состояния скважинной штанговой насосной установки на основе динамометрирования и нейросетевых технологий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И.В. Дунаев. – Уфа, 2007. – 16 с.

6. Белов, И.Г. Исследование работы глубинных насосов динамографом / И.Г. Белов. – М.: Гостехиздат, 1960. – 126 с.

7. Светлакова, С.В. Информационно-измерительная система динамометрирования скважин, оборудованных штанговыми глубинными насосами: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.В. Светлакова. – Уфа, 2008. – 16 с.

8. Сравнительный анализ возможностей отечественных и импортных систем автоматизации скважин, эксплуатируемых ШГН / М.И. Хакимьянов, С.В. Светлакова, Б.В. Гузеев и др. // Нефтегазовое дело. – 2008. – № 2. – С. 1–22.

9. Ковшов, В.Д. Динамометрирование, моделирование и диагностирование состояния глубоинной штанговой насосной установки / В.Д. Ковшов, М.Е. Сидоров, С.В. Светлакова // Известия вузов. Нефть и газ. – 2011. – № 3. – С. 25–29.

10. Ковшов, В.Д. Моделирование динамограммы станка-качалки. Нормальная работа

насоса / В.Д. Ковшов, М.Е. Сидоров, С.В. Светлакова // Нефтегазовое дело. – 2004. – Т. 2. – С. 75–81.

11. Ковшов, В.Д. Моделирование динамограммы станка-качалки. Утечки в клапанах / В.Д. Ковшов, М.Е. Сидоров, С.В. Светлакова // Нефтегазовое дело. – 2005. – Т. 3. – С. 47–54.

12. Садов, В.Б. Определение границ участков динамограммы при ее обработке / В.Б. Садов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 17. – № 35 (294). – С. 11–16.

*Поступила в редакцию 21 ноября 2012 г.*