

**Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и
газа**

На правах рукописи

Хашханов Иса Геланаевич

УДК 622.276.53:621.671.(047)

**КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШТАНГОВОЙ
КОЛОННЫ ГЛУБИННО-НАСОСНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ
ДОБЫЧИ НЕФТИ**

**Специальность 05.11.13 – приборы и методы контроля и
определения состава веществ**

**Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Замиховский Л.М.**

Ивано-Франковск - 2007

д 316



СОДЕРЖАНИЕ

	с.
ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШТАНГОВОЙ КОЛОННЫ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПЛЕКСА СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	11
1.1. Особенности работы штанговой колонны ГНШУ	11
1.2. Причины и факторы, обуславливающие дефекты и отказы штанговой колонны, находящейся под действием комплекса силовых факторов.....	19
1.3. Анализ математических моделей штанговой колонны, находящейся под действием силовых факторов.....	29
1.4. Анализ методов и технических средств диагностирования ГНШУ.....	35
1.5. Обоснование и выбор направления исследований.....	44
РАЗДЕЛ 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ШТАНГОВОЙ КОЛОННЫ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПЛЕКСА СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ.....	47
2.1. Общая модель процесса деформирования штанговой колонны в скважине с криволинейной осью	47
2.2. Определение количества витков спирали штанговой колонны по ее оси после потери устойчивости	54
2.3. Моделирование колебаний штанговой колонны в процессе запуска и в установившемся режиме работы ГНШУ.....	58
2.4. Моделирование напряженного состояния штанговой колонны с учетом ее винтовой конфигурации оси в вертикальной скважины.....	65

2.5. Моделирование сил сопротивления, возникающих при движении штанговой колонны после потери ее устойчивости.....	72
Выводы к разделу.....	75
РАЗДЕЛ 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧНОГО, АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТОДА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ШТАНГОВОЙ КОЛОННЫ	77
3.1. Методика проведения экспериментальных исследований.....	77
3.2. Разработка программного обеспечения метода контроля технического состояния штанговой колонны, находящейся под действием силовых факторов	79
3.3. Исследования влияния спиралевидности штанговой колонны ГНШУ на форму динамограммы.....	84
3.4. Усовершенствование алгоритма диагностирования ГНШУ по динамограмме с учетом спиралевидной деформации штанговой колонны.....	98
3.5. Апробация алгоритма диагностирования ГНШУ, учитывающего спиралевидную деформацию штанговой колонны, на экспериментальных данных.....	104
Выводы к разделу.....	108
РАЗДЕЛ 4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГНШУ	109
4.1. Разработка функциональной схемы системы диагностирования ГНШУ.....	109
4.2. Разработка электронной части первичного преобразователя системы диагностирования ГНШУ	111
4.3. Разработка программного обеспечения системы диагностирования ГНШУ	116
4.3.1. Разработка программного обеспечения устройства преобразования измерительной информации.....	116

4.3.2. Разработка программного обеспечения высокого уровня для системы диагностирования ГНШУ	118
4.4. Определения погрешности измерительного преобразователя системы диагностирования ГНШУ	125
4.5. Определения показателя готовности системы диагностирования ГНШУ	130
4.6. Определение эффективности диагностирования системы диагностирования ГНШУ	143
Выводы к разделу.....	149
ВЫВОДЫ.....	151
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	154
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	166

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Использование глубинно-насосных штанговых установок (ГНШУ) в настоящее время остается наиболее распространенным в отечественной и зарубежной нефтяной промышленности способом добычи нефти, что обуславливается простотой конструкции, обеспечивающей их надежность и простоту эксплуатации. В тоже время, несмотря на кажущуюся простоту конструкции, имеют место многочисленные отказы и аварии, количество которых постоянно возрастает, особенно при эксплуатации наклонных и наклонно-направленных скважин. Использование в этих случаях общепринятых динамометрических методов диагностирования с целью определения технического состояния ГНШУ дает значительную погрешность, а в отдельных случаях – постановку неправильного диагноза при распознавании динамограмм и отнесении их к заранее определенным классам дефектов. Это обусловлено сложными условиями эксплуатации ГНШУ в наклонных и наклонно-направленных скважинах, в которых, в отличие от вертикальных, колонна насосно-компрессорных труб (НККТ) и штанговая колонна находятся под действием комплекса силовых факторов, создающих растягивающие, изгибающие и вращающие напряжения.

Действие последних приводит к образованию спиралевидной формы штанговой колонны, увеличению сил трения о стенки НКТ, изменению длины хода плунжера и т.п. Игнорирование указанных факторов может привести к неправильной интерпретации динамограммы и, как следствие – обрыву штанговой колонны, появлению сквозных отверстий в колонне НКТ, потере подачи ГНШУ, отвороту штанг и др.

В связи с этим, актуальной является задача усовершенствования динамометрических методов диагностирования ГНШУ с учетом состояния

штанговой колонны, находящейся под действием комплекса силовых факторов.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Тематика диссертации является частью плановых научно-исследовательских программ развития нефтепромыслового комплекса Украины и основывается на результатах научно-исследовательской работы «Разработка теоретических и методологических принципов диагностирования оборудования нефтегазового комплекса Украины», частью научно-исследовательской тематики 45/1, номер государственной регистрации в УкрНИИНТИ №01980005799, которая входит в координационный план Министерства образования и науки «Научные основы разработки новых технологий добычи нефти и газа, газопромыслового оборудования, углубленной переработки нефти и газа с целью получения высококачественных моторных масел, вспомогательных продуктов и нефтехимического сырья». Указанный план входит в национальную программу «Нефть и газ Украины»

Цель и задачи исследований. Целью работы является разработка метода контроля состояния штанговой колонны, находящейся под действием комплекса силовых факторов, позволяющего повысить достоверность динамометрических методов диагностирования ГНШУ и, соответственно, надежность их эксплуатации.

Для осуществления поставленной цели были определены следующие задачи исследований:

1. Проанализировать особенности работы штанговой колонны ГНШУ, находящейся под действием комплекса силовых факторов, а также методы и средства диагностирования ее технического состояния.
2. Разработать теоретические предпосылки метода контроля состояния штанговой колонны, находящейся под действием комплекса силовых факторов.

3. Исследовать влияние состояния штанговой колонны, находящейся под действием комплекса силовых факторов, на достоверность диагностирования ГНШУ динамометрическими методами.

4. Разработать технические средства и микропроцессорную систему на основании усовершенствованного алгоритма диагностирования по динамограмме.

5. Провести промышленную апробацию метода контроля штанговой колонны, находящейся под действием комплекса силовых факторов.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые разработана математическая модель процесса деформирования в колонне НКТ, имеющей произвольную трехмерную конфигурацию оси, штанговой колонны с учетом ее спиралевидности, позволяющая рассчитывать напряженное состояние деформированной колонны.

2. Впервые предложена модель оценки сил сопротивления, возникающих при движении штанговой колонны после потери устойчивости, с учетом пространственных конфигураций осей штанговой и колонны НКТ, а также получены эмпирические формулы для их определения, составляющие основу предлагаемого метода контроля состояния штанговой колонны.

3. На основании созданных математических моделей процесса деформирования штанговой колонны и оценки сил сопротивления ее движению, учитывающий спиралевидность штанговой колонны и реальный профиль скважины, впервые разработан метод контроля состояния штанговой колонны, позволяющий прогнозировать также дефект типа „Обрыв штанг” с вероятностью 0.95.

4. Впервые определен характер изменения формы динамограммы, обусловленный спиралевидной деформацией штанговой колонны, и

предложено аналитическое представление эталонной динамограммы нормальной работы ГНШУ учитывающее эффект спиралевидности, использование которой позволяет повысить достоверность диагностирования ее состояния до 0.96.

Практическое значение полученных результатов состоит в:

- усовершенствовании алгоритма диагностирования ШГНУ по динамограмме на основании расчета меры подобия между экспериментальной динамограммой и эталонными динамограммами различных технических состояний, полученными из эталонной динамограммы нормальной работы, учитывающей эффект спиралевидности;
- создании тензорезистивного динамометрического преобразователя накладного типа, технические характеристики которого соответствуют известным зарубежным аналогам;
- разработке микропроцессорной системы диагностирования ГНШУ на основе динамометрического преобразователя накладного типа и ПЭВМ, использование которой позволяет получать оперативную и достоверную информацию о техническом состоянии ГНШУ в реальном режиме времени.

Разработанные метод и микропроцессорная система диагностирования прошли промышленную апробацию на скважинах Б-320, Б-720 Бытковского месторождения, скважинах Д-66 и Д-67 месторождения «Довбушаны» и скважине П-812 Пасичнянского месторождения НГДУ "Надворнаянефтегаз" и приняты для дальнейшего внедрения.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе – в рабочих программах дисциплин "Основы теории надежности и технической диагностики систем", "Методы и средства диагностирования объектов нефтегазового комплекса", "Проектирование систем диагностирования", которые читаются для студентов специальности 7.0914.01 – "Системы управления и автоматики".

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты работы получены автором самостоятельно. Разработаны математические модели процессов деформирования [88] и трехмерного деформирования [91] штанговой колонны в скважине с криволинейной осью. Проведено моделирование процесса колебаний ГНШУ в процессе запуска и в установившемся режиме [94], а также моделирование напряженного состояния штанговой колонны с учетом винтовой конфигурации оси в прямолинейной скважине [98]. В работах, опубликованных в соавторстве, предложена математическая модель нестационарного деформирования ГНШУ, представленной полубесконечным стержнем и телом конечной массы [96], предложена формула для определения тензора деформаций штанговой колонны [99], получены формулы для определения количества витков спирали при деформировании штанговой колонны [87], исследовано влияние спиралевидности штанговой колонны на изменение формы динамограммы [102], предложена методика расчета показателя готовности системы диагностирования ГНШУ, учитывающая влияние человека-оператора [118], предложена структурная схема системы диагностирования ГНШУ [108].

Апробация результатов исследований. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVIII, XIX, XX, XXI, XXII Международных межвузовских школах-семинарах «Методы и средства технической диагностики» (Ивано-Франковск, 2001, 2003, 2005гг. – Украина и Йошкар-Ола, 2002, 2004, 2006гг. – Республика Марий-Эл – Россия); 3-ей научно-технической конференции «Современные приборы, материалы и технологии для неразрушающего контроля и технической диагностики промышленного оборудования (г. Ивано-Франковск, 2002г.); научных семинарах кафедры компьютерных технологий в системах управления и автоматике (2002- 2006гг).

Публикации. По результатам исследований, которые изложены в диссертации, опубликовано 10 работ, из которых 5 – в изданиях, включенных в перечень ВАК, а 4 статьи опубликованы лично.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, изложенных на 217 страницах текста, 35 рисунков, 7 таблиц, списка использованных источников, который содержит 120 наименований, и 4 приложений на 53 страницах.

РАЗДЕЛ 1

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШТАНГОВОЙ КОЛОННЫ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПЛЕКСА СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1. Особенности работы штанговой колонны ГНШУ

В настоящее время наиболее распространенным способом механизированной добычи нефти остается глубинно-насосный с использованием штанговых установок (ГНШУ). Несмотря на кажущуюся простоту конструкции ГНШУ она имеет ряд особенностей, которые обуславливают отказы и аварии в процессе эксплуатации.

Насосный способ эксплуатации характеризуется неодинаковым характером нагрузки колонны труб и насосных штанг в связи с тем, что колонна насосных труб наравне с колонной штанг попеременно подвергается статическим и динамическим воздействиям столба жидкости над плунжером за цикл работы ГНШУ. Эти условия осложняются с увеличением диаметра, подвески насоса и скорости откачки жидкости. Так, при ходе балансира станка-качалки вверх вес жидкости над плунжером насоса передается штангам, которые растягиваются, а колонна НКТ, освободившаяся от этой нагрузки, сокращается. Трубы при этом испытывают внутреннее гидростатическое давление как в радиальном, так и в осевом направлении. В радиальном направлении давление передается боковой поверхности труб, а в осевом – на поверхность, равную разности площадей канала трубы и плунжера насоса.

При ходе штанг вниз нагнетательный клапан насоса открыт, и жидкость под плунжером перетекает во внутреннюю полость труб над плунжером. Верхняя часть насосных штанг при этом находится в растянутом

состоянии под действием собственного веса, а нижняя часть над плунжером испытывает сжатие силой, обусловленной перепадом давления при движении жидкости через нагнетательный клапан. Колонна НКТ под действием этой нагрузки удлиняется, а трубы заполненные жидкостью, испытывают гидростатическое давление. В отличие от хода штанг вверх давление в осевом направлении передается на всю площадь канала трубы.

Под действием силы Q приложенной к плунжеру при ходе штанг вниз (силы сжатия), нижняя часть штанговой колонны разгружается, в результате чего она получает продольный изгиб от собственного веса штанг в жидкости. Критическая нагрузка первого порядка создает одну полуволну изгиба, второго порядка – две полуволны. Как показывает расчет [1], сила Q в несколько десятков раз превышает критические нагрузки первого порядка поэтому в нижней части колонны штанг возникает множество полуволн изгиба. Этот вывод представлен в работах [2, 3]. Следовательно, даже при достаточно небольших нагрузках на плунжер штанги изгибаются и дальнейшая передача усилия плунжеру производится через изогнутую штангу. При этом в штангах возникает напряжение изгиба, т.е. при продольном изгибе штанг в колонне НКТ образуется пространственная спираль, витки которой касаются стенок НКТ, а возникающие силы трения уравнивают часть нагрузки, передаваемой штангам. Для каждого размера штанг и труб, в зависимости от коэффициента трения, существует предельная нагрузка, больше которой нельзя передать на плунжер. Если сила больше предельной, то будет увеличиваться число витков спирали и движение плунжера замедлится.

При эксплуатации скважин штанговыми насосами колонна НКТ, находящаяся выше насоса, может потерять устойчивость при ходе плунжера вверх и изогнуться даже будучи растянутой [4]. Возможность изгиба нижней части колонны НКТ над насосом в ГНШУ впервые была доказана американскими исследователями А.Лубинским и К.А.Блеканкарном (1955 г.).

Возможность спиралеобразной формы изгиба низа колонны НКТ при ходе плунжера вверх была также доказана экспериментально на модели ГНШУ [5]. Косвенным доказательством наличия данного явления может служить двух- или трехстороннее изнашивание трубы в одном сечении, о чем указывается в работе [6].

Несмотря на то, что в последние годы наблюдается тенденция увеличения глубины подвесок штанговых насосов, в отечественной нефтепромысловой практике этим вопросам не уделяется должного внимания.

Для нефтепромысловой практики представляет интерес выяснить: изгибаются ли низ колонны НКТ и колонна штанг или возможен их совместный изгиб при ходе плунжера вверх, т.е. когда штанговая колонна растянута. В пользу этого предположения свидетельствуют то, что жесткость штанговой колонны пренебрежимо мала по сравнению с жесткостью колонны НКТ. Это позволило многим исследователям рассматривать штанговую колонну как тяжелую нить [7]. Исследование совместного продольного изгиба колонны НКТ и штанг при работе скважинного насоса с использованием предложенного энергетического метода приведено в [8]. В результате исследований установлено, что при ходе плунжера вверх и изгибе нижней части колонны НКТ изгибается также и штанговая колонна. При определенных скважинных условиях совместный изгиб колонны НКТ и штанг может вызвать появление в нижней части штанговой колонны больших сил трения, возникающих одновременно с процессом нагрузки штанг гидростатической силой. Однако они могут остаться незамеченными на динамограмме вследствие суммирования с дифференциальной нагрузкой на плунжер. Игнорирование учета данных сил трения в нижней части штанговой колонны может привести к неправильной интерпретации динамограмм.

Одной из составляющих, действующих на нижние штанги, являются радиальные гидростатические силы. Влиянию их на величину напряжений, возникающих в длинном стержне, погруженном в жидкость, посвящен ряд теоретических работ. Применительно к насосным штангам, этот вопрос рассмотрен в [9], где для учета влияния этих сил предлагается поправка к формулам для расчета колонн. В [10] приведены результаты экспериментального исследования этого вопроса, которые показали, что действие радиальных гидростатических сил, приложенных к штанговой колонне, эквивалентно действию осевой растягивающей нагрузки. Эта нагрузка сокращает длину участка, сжимаемого осевой гидростатической силой и испытывающего знакопеременные напряжения в течение цикла глубинного насоса. Длина этого участка определяется по формуле (1.1)

$$z_0 = \frac{1 - 2\mu}{\frac{\gamma_{\text{ж}}}{\gamma_{\text{ст}}} - 2\mu} L, \quad (1.1)$$

где z_0 – расстояние от плунжера до нейтрального сечения, выше которого штанги подвергаются переменной нагрузке по ассиметричному циклу со средним напряжением растяжения, а ниже – знакопеременной нагрузке;

$\gamma_{\text{ж}}$ и $\gamma_{\text{шт}}$ – соответственно удельный вес жидкости и материала штанг;

L – длина штанговой колонны, погруженная в скважинную жидкость, а не по известной формуле (1.2), которая не учитывает влияния радиальных сил давления

$$z = \frac{\gamma_{\text{ст}}}{\gamma_{\text{ж}}} L, \quad (1.2)$$

т.е. в нейтральной точке чаще всего и происходит обрыв штанг.

Изменение длины хода плунжера происходит вследствие удлинения насосных штанг и труб под действием растягивающих усилий, возникающих

при работе глубинного насоса. Как было отмечено выше, при движении плунжера вверх сила тяжести столба жидкости передается на штанги, которые удлиняются, а трубы укорачиваются. При движении вниз происходит обратное уменьшение длины хода плунжера, которое определяется из условия

$$\Delta l = \Delta l_{\sigma\delta} + \Delta l_{\delta\delta}, \quad (1.3)$$

где Δl – уменьшение длины хода плунжера;

$\Delta l_{\sigma\delta}$ – удлинение штанг,

$\Delta l_{\delta\delta}$ – укорочение труб.

Расчеты показывают, что удлинение штанг диаметром 22 мм при движении вверх составляет 250-350 мм на длину 1000 м. Проведенные экспериментальные измерения осевых деформаций штанг при работе ГНШУ с использованием прибора РК-25 [11] показали, что фактическое удлинение составляет до 10 см в нижней точке штанг, а не 25 см согласно проведенных расчетов.

Условия нагрузки колонны НКТ и насосных штанг рассматривались выше применительно к вертикальным скважинам, для которых силы сжатия состоят из сил трения плунжера в цилиндре насоса и сил гидравлического сопротивления в нагнетательном клапане. Однако на практике абсолютно-вертикальные скважины встречаются редко. Поэтому спущенные в скважину трубы НКТ и штанги по длине ствола в некоторых местах приобретают профиль ствола скважины, вследствие чего в большинстве случаев имеет место сплошное касание колонны штанг о стенки НКТ. В связи с этим для наклонных и наклонно-направленных скважин к указанным силам добавляется сила механического трения. В [12] коэффициент трения находится как отношение силы трения к нормальной силе, прижимающей муфту к НКТ. Результаты экспериментального определения коэффициента

трения K_{mp} показали, что наибольшее значение $K_{mp}=0,49$ характерно в период приработки. При нормальной силе $Q=2,0$ кН и износе 0,9 мм коэффициент трения составил $K_{mp}=0,31$, а при дальнейшем увеличении нормальных сил до $Q=3,5$ кН его значение уменьшилось до $K_{mp}=0,24$ и при $Q=4,0$ кН возросло до $K_{mp}=0,28$. Исходя из полученных результатов в [12] рекомендуется при подборе штанговых колонн для наклонно-направленных скважин значение коэффициента трения принять равным $K_{mp}=0,3$.

Наклонные профили скважин оказывают существенное влияние и на работу подземного оборудования. Силы, действующие на штанговую колонну можно определить по снятой динамограмме. На рис.1.1 приведены динамограммы, снятые на скважинах с различным углом наклона [13], из которых видно, что с увеличением угла наклона скважины резко возрастают силы трения о стенки НКТ в виде почти вертикальных участков, расположенных в начале линии растяжения штанг. Масса штанг в жидкости, показанная на динамограммах пунктирной линией и определенная путем поднятия прочерченной динамографом линии массы штанг на величину трения, с увеличением угла наклона скважины снижается, так как часть ее ложится на стенки НКТ и может быть определена выражением

$$D'_{\sigma\sigma} = D_{\sigma\sigma} \cdot \tilde{m} \sin \alpha, \quad (1.4)$$

где $P_{шт}$ – теоретическая масса штанг в жидкости,

α – приведенный угол наклона скважины на глубине спуска насоса,

$$\cos \lambda = \frac{H_{\tilde{m}} - L}{H_{cn}}, \quad (1.5)$$

где H_{cn} – глубина спуска насоса;

L – удлинение ствола скважины на глубине подвески насоса.

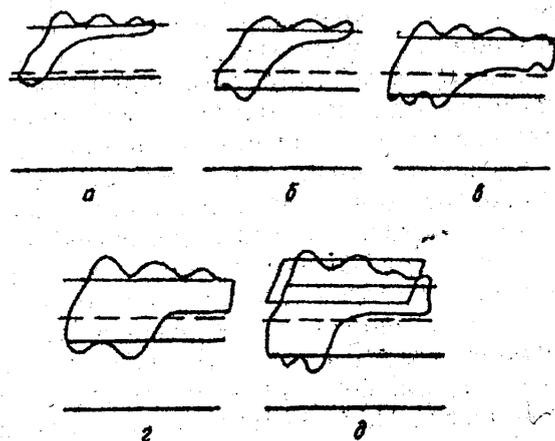


Рис. 1.1. Динамограммы, снятые на скважинах с углом наклона:

а) – $\alpha = 8^{\circ}$, б) – $\alpha = 16^{\circ}$, в) – $\alpha = 23^{\circ}$, г) – $\alpha = 29^{\circ}$ и д) – $\alpha = 33^{\circ}$.

Аналогично с увеличением угла наклона скважины уменьшается нагрузка от массы жидкости НКТ. Однако вследствие проявления сил инерции снижение максимальной нагрузки на головку балансира несколько сглаживается. Резкое увеличение сил трения с ростом угла наклона скважины приводит к значительному снижению минимальной нагрузки на головку балансира, что вызывает повышение амплитуды нагрузок на штанги и рост приведенного напряжения [13]. В [14] показано, что при сплошном касании колонны штанг о стенки НКТ снятая на участке скважины динамограмма не фиксирует точную величину веса колонны штанг в жидкости, что приводит, например, к неправильному определению давления у приема насоса, дебита скважины или технического состояния глубинного насоса.

Проведенные автором [12] расчеты для усредненного профиля скважин по НГДУ «Сургутнефть», «Мегионнефть», «Белозернефть», «Строжевойнефть» и различных компоновок штанговой колонны показывают, что нормальные силы при ходе колонны вверх не превышают $Q=700$ Н. Для ряда скважин, где отмечается резкое изменение зенитного угла, при наборе кривизны характерно проявление нормальных сил, достигающих до $Q=1,8$ кН. При ходе вниз в растянутой части колонны



нормальные силы не превышают $Q=0,740$ кН, в интервале продольного изгиба – $Q=1,23$ кН. С учетом силы сжатия, равной $Q=6,0$ кН, нормальные силы в интервале продольного изгиба могут достигать до $Q=4,0$ кН.

Длина хода плунжера скважинного насоса является одним из важных параметров, определяющих производительность ГНШУ [1, 15]. Проведенные экспериментальные [16] и теоретические исследования [17, 18] свидетельствуют о том, что длина хода плунжера отличается от длины хода точки подвески штанг. Это объясняется упругими деформациями штанговой колонны под действием приложенных статистических и динамических сил. Исследования деформаций штанг в искривленных скважинах и их влияние на уменьшение хода плунжера приведены в [19]. Результаты расчетов показали, что при увеличении угла искривления скважины возрастают потери хода плунжера. При угле искривления $\varphi=30^\circ$ потери хода возрастают на 50% по сравнению с вертикальной скважиной, а при угле наклона $\varphi=45^\circ$ потери хода увеличиваются вдвое. В скважине с двумя участками искривления потери хода в меньшей мере возрастают при увеличении угла наклона, однако больше зависят от соотношения вертикальных и наклонных участков. Так, при $\varphi=30^\circ$ потеря хода увеличилась на 23 %, а при увеличении нижнего участка штанговой колонны в 1,4 раза от верхней потеря длины хода плунжера увеличилась на 60 %.

При спуске в скважину и при работе насосной установки колонны НКТ и штанг испытывают растягивающие, изгибающие и вращающие напряжения. Причины возникновения растягивающих и изгибающих напряжений, рассмотренные выше не вызывают сомнений, они очевидны. Относительно природы возникновения вращающих напряжений и крутящих моментов сегодня нет единого мнения. Тем не менее, крутящие моменты, возникающие в колонне НКТ и штанговой колонне, на практике имеют место. Подтверждением этого является то, что одной из причин полетов труб в наклонно-направленных скважинах может быть отворот в резьбовом

соединении, а также вращение канатной подвески, достигающее до 30 град. вокруг оси, происходящее в определенной категории скважин в процессе работы ГНШУ. В [20] авторы исходили из того, что возникновение крутящих моментов в колонне НКТ и штанг, находящихся в пространственно-искривленных скважинах, происходит подобно тому, что и в винтовых цилиндрических пружинах при приложении растягивающих или сжимающих усилий. Если рассмотреть колонну штанг в вертикальной скважине и мысленно провести линию по образующей колонны штанг, то линия по отношению к оси колонны будет находиться в одном азимутальном направлении. Если поместить эту колонну в пространственно-искривленную скважину, то мысленно проведенная линия примет форму винта с углом закручивания. При приложении растягивающей нагрузки винтовая линия стремится раскручиваться, что и вызовет возникновение крутящего момента.

В результате проведенных расчетов по предлагаемой методике установлено, что в пространственно-искривленных скважинах колонна насосных штанг испытывает крутящие моменты, причем наибольшие крутящие моменты возникают в зоне набора кривизны ствола скважины. Это не означает, что крутящие моменты, возникающие в колонне штанг, не могут стать непосредственной причиной отворотов при их нормальном завинчивании. Поэтому наличием и направлением крутящих моментов при спуске колонны штанг не следует пренебрегать.

1.2. Причины и факторы, обуславливающие дефекты и отказы штанговой колонны, находящейся под действием комплекса силовых факторов

Результаты анализа отечественных и зарубежных источников, в которых рассматриваются причины отказов, а также анализируется

аварийность ГНШУ, показали, что факторы, обуславливающие возникновение отказов, сводятся к квалификации, приведенной в [21]. Согласно этой классификации выделены следующие основные факторы: конструкторские, технологические, эксплуатационные, человеческий фактор и вибрация.

Конструктивные факторы отображают неудачные конструкторские решения и несовершенный выбор параметров контроля и защиты. Они поэтапно ликвидируются в процессе дальнейшей модернизации узлов установки.

Технологические – определяются уровнем конкретного производства и технологичностью конструкции, а также уровнем стабильности производства узлов установки.

Эксплуатационные – связаны с условиями эксплуатации ГНШУ.

Человеческий фактор – отображает поведение персонала во время обслуживания, ремонта, эксплуатации ГНШУ (неправильные действия, несоблюдение ТУ, отсутствие внимания, небрежность и др.).

Вибрация – отделена от эксплуатационных факторов как одна из наиболее влиятельных и наименее изученных причин возникновения отказов. Она обусловлена совокупностью вышеперечисленных факторов и осуществляет преобладающее влияние на развитие дефектов. Основываясь на рассмотренной выше классификации в [22] факторы, обуславливающие возникновение дефектов, условно разделены на две группы – эксплуатационные (человеко-зависимые) и скважинные (человеко-независимые) исходя из причин их появления и характера проявления в процессе эксплуатации. Факторы первой группы, как правило, присутствуют еще до начала эксплуатации узлов ГНШУ и обусловлены либо дефектами, возникшими на стадии изготовления, транспортировки и монтажа (скрытые дефекты в материале, повреждения при транспортировке и монтаже, некачественное свинчивание и др.), или неоптимальным выбором

типоразмеров узлов и режима работы установки (несоответствие степени пригонки, неправильное регулирование длины штанг, чрезмерная динамичность режима работы, чрезмерное или недостаточное погружение под динамический уровень). Последнее может быть выявлено и устранено непосредственно после монтажа новых узлов, в то время как влияние скрытых дефектов проявляется лишь после неявно причиненного ими полного отказа (например, обрыв штанг вследствие усталостных процессов в материале при условии наличия скрытого дефекта, быстрому развитию которого они способствуют). Основное отличие факторов второй группы в сравнении с рассмотренной выше состоит в том, что они постоянно присутствуют в процессе работы или проявляются в непредвиденные моменты вследствие изменения пластовых условий (характеристика добываемой жидкости, температура и давление на забое). Влияние факторов этой группы может способствовать ряду нештатных явлений (оседание парафина, создание песчаных пробок, заедание плунжера, поздняя посадка шарика в седло, зависание штанг), которые, в свою очередь, способствуют возникновению и развитию дефектов путем интенсификации деградационных процессов узлов ГНШУ.

Детальное описание дефектов ГНШУ, которые относятся к рассмотренным группам факторов их обуславливающих, приведено в [1, 21, 23 – 31 и др.]. Не останавливаясь на их анализе, отметим, что наиболее распространенным видом отказов, обусловленных дефектами, являются обрыв штанговой колонны и отвинчивание штанг. В табл.1.1 приведены данные по отказам штанговой колонны НГДУ «Надворнаянефтегаз» за 2006 год из которой видно, что из 6 причин отказов 30,6% приходится на обрывы по муфте, одинаковое количество отказов – по 22,2% приходится на обрывы полированного штока и обрывы по телу штанг. На отвинчивание штанг приходится 16,7% всех отказов, а наименьшее количество отказов составляет обрыв штока насоса – 5,5% и обрыв по резьбе – 2,8%.

Таблица 1.1

Анализ отказов колонны насосных штанг за 2006 год на скважинах
месторождений НГДУ "Надворнаянефтегаз" ОАО «Укрнефть»

№ скважины	Диаметр насоса, мм	Глубина спуска, м	Длина хода, м	Число колебаний, п	Режим работы, работа/накопл., час	Дата проведения ремонта	Количество отказов	Причина ремонта
260-Б	32	1934	3,0	5,0	6/18	08.06	1	ОВ
306-Б	32	2432	3,0	6,0	7/17	09.06 07.06	1 1	ОМ ОВ
308-Б	32	2216	2,5	6,0	8/16	03.06	1	ОПШ
489-Б	32	1280	3,0	5,0	10/38	08.06	1	ЗПШ
463-Б	32	2014	2,0	7,0	24/0	02.06 03.06 04.06 10.06	2 1 1	ОШ, ОВ ЗПШ
506-Б	32	1801	3,0	5,0	8/16	02.06	1	ОВ
617-Б	32	2131	3,0	6,0	6/18	10.06	1	ОВ
632-Б	32	1909	1,6	6,0	4/20	10.06	1	ЗПШ
704-Б	32	2281	2,5	6,0	7/17	01.06	1	ОПШ
708-Б	32	2056	2,4	6,0	6/18	05.06	1	ОПШ
709-Б	32	1845	1,8	6,0	4/20	05.06	1	ОПШ
712-Б	32	2025	3,0	6,0	6/18	04.06 07.06 08.06 05.06	3 1	ОМ ОР
812-Б	32	2101	2,8	6,0	7/17	06.06	1	ОШН
ГВ-80	32	1755	3,0	6,0	6/18	10.06	1	ОШН
Д-60	32	1932	3,0	6,5	11/13	02.06	1	ОПШ
Д-2	32		3,0	6,0	10/14	06.06	1	ЗПШ
Д-14	38	1914	3,0	6,0	11/13	01.06	1	ОМ
Д-51	32		2,5	6,0	10/14	08.06	1	ОПШ
Д-53	32	1920	3,0	6,0	10/14	07.06	1	ОПШ
Д-66	32	1760	3,0	6,0	8/16	03.06	1	ОПШ
Д-67	32	2183			11/13	05.06 09.06 10.06	3	ОШ

Продолжение таблицы 1.1

№ скважины	Диаметр насоса, мм	Глубина спуска, м	Длина хода, м	Число колебаний, п	Режим работы, работа/накопл., час	Дата проведения ремонта	Количество отказов	Причина ремонта
Д-72	32	1896	2,5	6,0	4/20	06.06 07.06	2	ОШ
Д-88	32	1823	3,0	6,0	11/13	05.06. 10.06	2	ОМ
Д-89	32	1982	3,0	6,0	11/13	10.06	1	ОМ
Д-93	32	1921	2,5	6,0	11/13	01.06	1	ОМ
Д-119	32	1850	3,0	6,0	11/13	04.06.	1	ОМ
Д-128	32	2090	3,0	6,0	10/14	07.06	1	ОМ
Л-7	32	1478	2,0	6,5	4/44	10.06	1	ОШ
Л-51	32	1444	2,0	5,5	3/21	07.06	1	ОВ
Л-81	32	1420	2,0	7,0	6/18	02.06		ЗПС

Проанализируем более детально природу возникновения и причины рассмотренных отказов по штанговой колонне.

Причина обрыва штанг обусловлена сложными условиями работы, в процессе которой они подвергаются воздействию циклических нагрузок растяжения-сжатия, что способствует возникновению усталостных трещин, а пластовая жидкость, в которой постоянно находится штанговая колонна, в большинстве скважин является коррозионно-активной (содержит минерализованную воду, сероводород), что способствует их коррозии. Результаты проведенных исследований [32] показали, что скорость коррозии конструкционных деталей, широко применяемых для деталей глубинного оборудования, при температуре $t=60^{\circ}\text{C}$ превышает скорость коррозии при $t=20^{\circ}\text{C}$ в $10,5\div 28,8$ раз в зависимости от химического состава стали и способа ее защиты от коррозии. Совместное действие указанных факторов предопределяет коррозионно-усталостный механизм разрушения большинства штанг.

По данным Ришмюллера [33] этот механизм является причиной обрывов штанг в 90% случаев, а по Адонину [2] – почти в 100%.

На промыслах Западной Сибири, где температуры в пласте практически всюду превышают $t=70$ °С и нередко достигают 100÷120 °С, а механические нагрузки, в связи с большой глубиной подвески насосов (1600 м и более) и искривленности скважин достигают критических величин, имеют место многочисленные обрывы штанг. Так, в ОАО «Нижневартовскнефтегаз» в 1997 г часто ремонтируемый фонд скважин составлял 20,6 %, а в ОАО «Тюменьнефтегаз» – 29,6 % от общего фонда скважин, оборудованных ГНШУ [34].

В [35] отмечено, что 22 % текущих ремонтов по НГДУ «Уфанефть» приходится на ликвидацию обрывов по телу штанг. Проведенные исследования по 96 оборванных штангах, изготовленных из стали марки 20Н2М и 15х2НМФ с различными видами термической обработки и взятых с различных участков по высоте колонны, показали, что изломы всех штанг имеют одинаковый явно выраженный усталостный характер. На поверхности изломов в зоне полома наблюдаются небольшие трещины, расположенные перпендикулярно излому. Они характерны для усталостных разрушений при наличии переменных изгибных напряжений.

Проведенные в [36] исследования 110 насосных штанг и 6 соединительных муфт к ним, разрушившихся за трехмесячный период на скважинах ПО «Куйбышевнефть» показал, что основной причиной было искривление и несоосность насосных штанг. В процессе эксплуатации такие штанги испытывали значительные переменные изгибные напряжения, которые и являлись причиной усталостных их разрушений. Аналогичные результаты получены в [35].

Из практики известно [37, 38], что при работе ГНШУ в штанговой колонне возникают заметные вибрации, которые оказывают вредное влияние, главным образом, на подземное оборудование. Из-за вибрации в штангах

появляются микротрещины, что в конечном итоге приводит к обрывам штанг, носящим в основном усталостный характер.

На основании анализа причин отказов установок ГНШУ в течении восьми лет по Кальчинскому месторождению [39] установлено, что причиной отказов установок является обрыв штанг (42,6 %). При этом наибольшее влияние на интенсивность отказов установок оказывает обводненность продукции, а также параметры, характеризующие углы искривления скважины.

Из промышленной практики известно, что одной из причин аварий со штанговыми колоннами является их износ вследствие трения о внутреннюю поверхность колонны НКТ.

На отдельных участках ствола с пространственным искривлением возникают большие прижимающие усилия и силы трения, зоны интенсивного износа штанг и труб, приводящие либо к обрыву колонны штанг, либо к появлению сквозных отверстий в НКТ и потере подачи насосной установки, преждевременному изнашиванию эксплуатационной колонны. Значимым фактором, ускоряющим темп износа подземного оборудования, является коррозия металла в агрессивной среде. Обводнение продуктивных пластов и повышенная минерализация попутно добываемой воды при наличии сил трения могут создавать условия интенсивного коррозионно-механического изнашивания металла штанг и труб. Износу оборудования способствует наличие в откачиваемой жидкости механических примесей, выносимых из пласта (прежде всего кварцевого песка), или образующихся в скважине (продукты коррозии металла). Попадая в зону трения, они могут многократно ускорить износ материала штанг и труб.

Проведенные в [40] исследования показали, что удельные прижимающие силы, скорости скольжения и вязкость откачиваемой нефти являются важнейшими факторами, определяющими износ штанг и труб. Рост

удельных прижимающих сил наблюдается, как правило, на участках интенсивного искривления ствола скважины.

Одной из причин снижения работоспособности штанговых колон в наклонно-направленных скважинах является их износ и, как следствие, обрыв. Проведенные в НГДУ «Стрежевойнефть» [12] исследования показали, что наибольшему износу подвергаются штанговые муфты, имеющие больший диаметр, чем тело штанг. Износ вызывается нормальной силой, прижимающей штанговую колонну к НКТ, и зависит от скорости скольжения и состава откачиваемой жидкости. Возникновение давления муфты на НКТ обусловлено искривлением ствола скважины и продольным изгибом низа штанговой колонны.

Повышение степени продольного изгиба в наклонно-направленных скважинах приводит к увеличению числа обрывов муфты в нижней части колонн [12], (табл.1.2)

Таблица 1.2

Анализ отказов по штанговой колонне

Число отказов, всего	25
В том числе по участкам колонны штанг:	
верхнему	9
среднему	5
нижнему	11

Проведенные в [41] исследования показали, что число обрывов штанг резко возрастает при превышении определенного значения приведенного напряжения σ_{np} в штанговой колонне. Причем эта критическая величина даже для штанг изготовленных из одной марки стали для различных месторождений и нефтяных регионов различна. В ОАО «Нижневартовскнефтегаз» 25 % всех отказов ГНШУ составляют обрывы штанг. При эксплуатации ГНШУ в наклонных скважинах частота обрывов

штанг возрастает. Появление сил трения при движении штанг в наклонном участке ствола скважины приводит к резкому возрастанию амплитуды растяжения, а износ штанговой муфты и тела приводит к уменьшению площади их поперечного сечения и повышению напряжений. На рис.1.2 (кривая 1) представлена зависимость частоты обрывов штанг от угла наклона скважины в интервале спуска насоса по НГДУ «Белозернефть», «Нижневартовскнефть», «Черногорнефть» [41]. Как видно из графика, при увеличении угла наклона с $\alpha=5^\circ$ до $\alpha=35^\circ$ частота обрывов штанг возрастает в 2 раза. Это связано со значительным увеличением амплитуды изменения напряжения в штангах σ_a с ростом угла наклона скважины. Так, средневзвешенное значение σ_a для скважин с углом наклона $\alpha=5^\circ$ и $\alpha=35^\circ$ составляет соответственно $\sigma_{a1}=2,3$ кгс/мм² и $\sigma_{a2}=3,7$ кгс/мм². На рис.1.2 показана зависимость частоты обрывов штанг от σ_a (кривая 2). Точка излома этой кривой соответствует значению $\sigma_a=2,5$ кгс/мм².

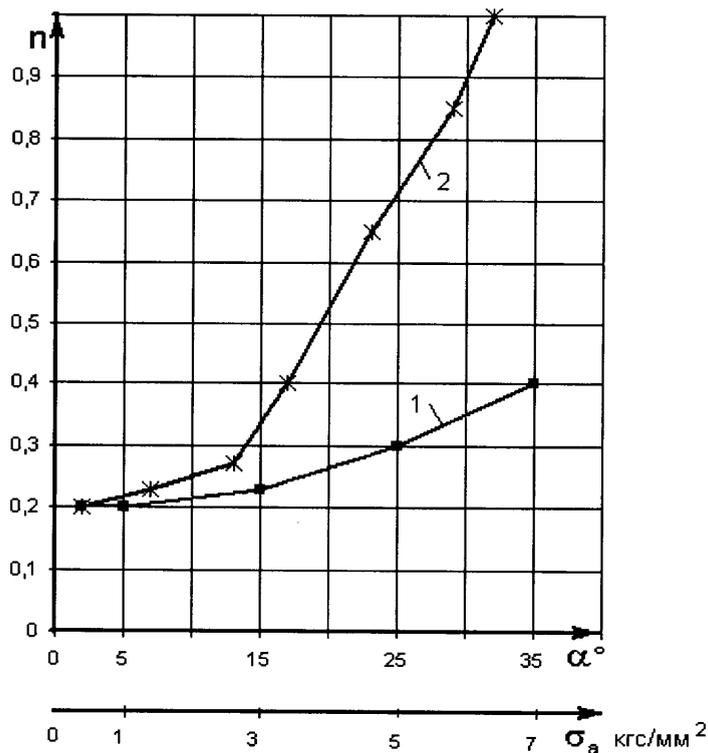


Рис. 1.2. Графики зависимости частоты обрывов штанг n от угла наклона скважины α и напряженного состояния штанг σ_a

На рис.1.3 приведены наиболее часто встречающиеся искривления скважин [31].

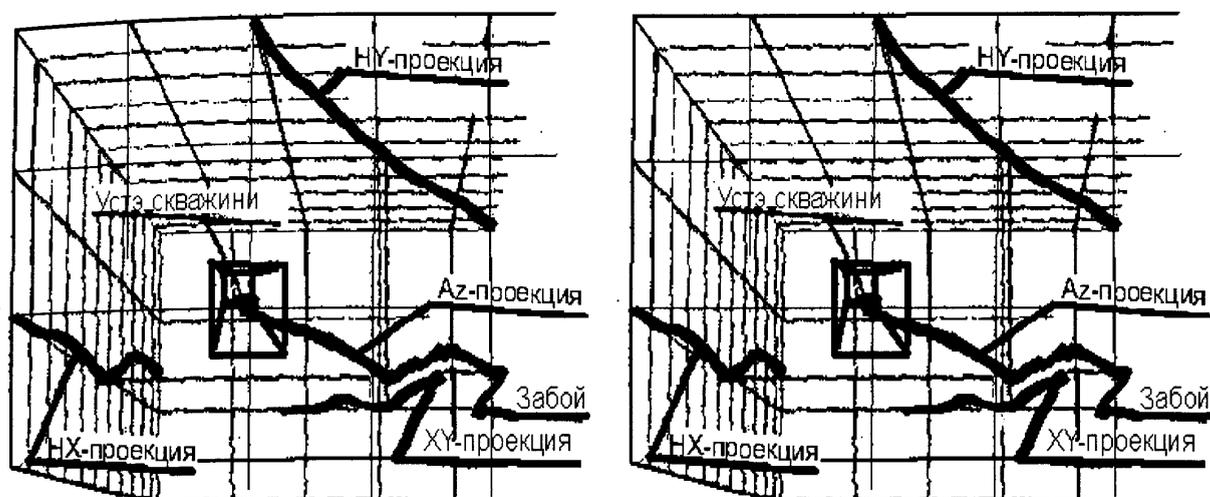


Рис. 1.3. Трехмерное изображение двух добывающих скважин

В работе [6] приводятся результаты анализа отработки штанговых колонн по НГДУ «Варьеганнефть», «Аксаковнефть», «Туймазанефть», которые позволили выделить две зоны износа: 1) в области максимального искривления ствола скважины; 2) на участках, прилегающих к скважинному насосу при больших глубинах подвески, причем как в вертикальных скважинах, так и в скважинах с небольшим углом отклонения ствола от вертикали. Вместе с тем имеются результаты наблюдений износа колонн НКТ при эксплуатации штанговых насосов по более чем 500 скважинам объединения «Азнефть» [7], которые также свидетельствуют о повышении степени износа НКТ при увеличении глубин подвески и на участках, приближенных к насосу. Увеличение износа штанг и труб НКТ на больших глубинах над насосом объясняется продольным изгибом штанг и труб, возникающим при работе штангового насоса.

В результате анализа скважин, на которых произошли обрывы и отвороты, авторами [31] сделан вывод о том, что аварии происходят в зоне

максимальных растягивающих нагрузок в интервалах набора интенсивного зенитного угла. Из-за увеличения сил сопротивления продольному перемещению плунжера насоса и сил трения штанг о стенки труб возрастает длина сжатого участка, что приводит к росту напряжений кручения в нижних штангах при ходе вниз и распространению крутильных волн вверх – в направлении устья наклонной скважины.

Важным фактором, влияющим на количество аварий, который довольно часто встречается на промыслах при эксплуатации ГНШУ – недостаточное крепление резьбовых соединений крутящих моментов, при которых возникает недостаточное усилие затяжки, усилие прижатия торцов ниппеля и соединительной муфты. В результате этого торцы ниппеля и муфты под действием внешней нагрузки расстыковываются, т.е. раскрываются, из-за чего резко увеличивается амплитуда рабочих напряжений в резьбовой части штанги.

1.3. Анализ математических моделей штанговой колонны, находящейся под действием силовых факторов

Моделирование работы ГНШУ проводится с учетом комплекса силовых факторов, действующих на исследуемый объект. Классическими работами в этом направлении являются труды Вирновского А.С. [15], в которых в качестве основных силовых факторов рассматривались силы веса, силы трения, которые в свою очередь определяются сухим трением плунжера в цилиндре, жидкостным трением в зазоре “цилиндр-плунжер”, гидравлическим трением, силами инерции, причем в подавляющем большинстве практических задач указанные силы трения и инерции аналитическому определению не поддаются и учитываются путем задания эмпирических коэффициентов в выражениях для статистических (весовых)

нагрузок. Закон движения полированного штока, определяемый в [15], предусматривает одномерную пространственную конфигурацию объекта, что приводит к рассмотрению различных вариантов волнового уравнения для определения перемещений точек штанговой колонны. Важное значение для описания функционирования исследуемых объектов имеют установленные Вирновским А.С. формулы для определения перемещений и усилий в любой точке колонны:

$$U = \frac{1}{2} \left[V\left(t + \frac{x}{a}\right) e^{\frac{1bx}{2a}} + V\left(t - \frac{x}{a}\right) e^{-\frac{1bx}{2a}} \right] - \frac{1}{2} \frac{g}{Ef} \int_{\frac{x}{a}}^{\frac{x}{a}} P(t + \tau) e^{\frac{1}{2}b\tau} d\tau, \quad (1.5)$$

$$P(t) = \frac{1}{2} \left[P\left(t + \frac{l}{a}\right) e^{\frac{1bl}{2a}} + P\left(t - \frac{l}{a}\right) e^{-\frac{1bl}{2a}} \right] - \frac{1}{2} \frac{Ef}{a} \times \\ \times \left[V\left(t + \frac{l}{a}\right) e^{\frac{1bl}{2a}} - V\left(t - \frac{l}{a}\right) e^{-\frac{1bl}{2a}} \right] - \frac{1}{4} b \frac{Ef}{a} \left[V\left(t + \frac{l}{a}\right) e^{\frac{1bl}{2a}} - V\left(t - \frac{l}{a}\right) e^{-\frac{1bl}{2a}} \right]; \quad (1.6)$$

а также выражение для скорости плунжера

$$V_1(t) = \frac{1}{2} \left[V\left(t + \frac{l}{a}\right) e^{\frac{1bl}{2a}} - V\left(t - \frac{l}{a}\right) e^{-\frac{1bl}{2a}} \right] - \frac{1}{2} \frac{a}{Ef} \times \\ \times \left[P\left(t + \frac{l}{a}\right) e^{\frac{1bl}{2a}} + P\left(t - \frac{l}{a}\right) e^{-\frac{1bl}{2a}} \right] + \frac{1}{4} b \frac{a}{Ef} \int_{\frac{l}{a}}^{\frac{l}{a}} P(t + \tau) e^{\frac{1}{2}b\tau} d\tau, \quad (1.7)$$

где $V(t)$, $P(t)$ – экспериментально определяемые скорость и усилие на полированном штоке;

E – модуль упругости материала;

F – площадь поперечного сечения штанги;

l – полная длина колонны штанг;

b – константа трения;

a^2 – квадрат скорости звука в исследуемой среде.

Формулы (1.5) – (1.7) являются основным аналитическим инструментом для построения динамограмм глубинно-насосной штанговой установки при решении широкого класса диагностических задач.

Динамика колонны насосно-компрессорных труб при работе глубинного насоса изучалась Узумовым Э.И. [42]. При этом также рассматривалась одномерная конфигурация оси для определения действующих усилий. Устойчивость штанговой колонны при глубинно-насосном способе эксплуатации с учетом искривления ее оси в плоскости исследовалась Сарояном А.Е. [6], которым определены критерии потери устойчивости объекта. Методика точного определения силы, действующей на точку подвеса штанговой колонны ГНШУ с учетом всех основных факторов, определяющих работу этой установки, предложена Кадиловым Н.Б., Бадаловым А.А. и др. [43]. При этом получены интегральные показатели силовых факторов. Вопросы исследования вынужденного колебательного движения штанговой колонны ГНШУ рассмотрены в работах Кадилова Н.Б. [44, 45], в которых определены: силы трения, действующие на колонну штанг станка-качалки; сила трения колонны штанг о жидкую среду и сила трения последней об стенку трубы, по которой она движется; сила трения плунжера о стену цилиндра глубинного насоса в виде интегральных характеристик по всей поверхности колонны штанг. В рассмотренных работах движение штанговой колонны также предполагается одномерным по пространственной координате. Разные режимы работы колоны исследованы Багировым М. М. [37], которым определен закон движения и усилия в штанговой колонне при наличии амортизатора в точке подвеса колонны. При этом рассмотрение явлений, протекающих при работе глубинно-насосных установок, приводит к постановке следующей математической задачи:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + 2b \frac{\partial U}{\partial t} - a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = 0, \quad (1.8)$$

$$EF \left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=l} = C[S(t) - U(l, t)], \quad (1.9)$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad (1.10)$$

$$U(x, t) = U(x, t + T), \quad (1.11)$$

где U – перемещение поперечного сечения колоны штанг;

x – координата сечения;

b – константа трения;

a – скорость звука;

T – период одного цикла;

E – модуль упругости;

F – площадь поперечного сечения штанг;

C – жесткость амортизатора;

$S(t)$ – закон перемещения точки подвеса штанг.

Аналитический метод контроля работы глубинных штанговых насосов предложен Касьяновым В. М. [46], указанный метод позволяет решать две основные задачи механики глубинных насосов:

– диагностики насосов, т.е. распознавание неисправностей по наземным данным с изучением фактического распределения напряжений по длине колонны штанг;

– расчета производительности насоса и усилий в штангах при выбранном режиме откачки с целью оптимизации действия глубинно-насосных установок в конкретных условиях.

Динамический расчет штанговой колонны ГНШУ с учетом сил трения о насосные трубы исследовался также в работах Чарного И.А. и др. [47, 48].

Уравнение (1.8) с разными граничными и начальными условиями решалось многими авторами с использованием различных аналитических методов исследования [15].

Вопросы гидродинамического трения в подземной части глубинно-насосной установки исследованы и решены в работах Пирвердяна А.М. [49] для случаев деформируемой и недеформируемой штанговой колонны.

Указанные модели используются при диагностировании технического состояния ГНШУ.

Как уже отмечалось, одним из основных методов диагностирования является метод анализа динамограмм ГНШУ. Теоретическое обоснование метода предложено Беловым И. А., Вирновским А. С., Пирвердяном А. М. [15, 28, 49], а дальнейшее исследование проводилось многими авторами [50, 51 и др.].

Моделирование динамограммы при работе ГНШУ проводилось с использованием данных об усилии, скорости и перемещении на верхнем конце штанги [50], в частности, исследовано влияние на динамограмму утечек в клапанах, недостаточного притока, закрытие нагнетательного клапана с запаздыванием. Указанный подход является более детальным по сравнению с методами дихотомической диагностики глубинно-насосной установки, который предусматривает определение текущего состояния объекта по классификации «работоспособен – неработоспособен» [52], при реализации которого используется метод ваттметрограмм. Известны работы по анализу временных рядов как метода прогнозирования и диагностики в нефтедобыче [53]. Возможность составления прогноза обеспечивается создаваемой в процессе работы базой данных, представляющей собой временные ряды параметров функционирования оборудования объекта. Изучены различные методы составления прогноза на основе данных информационно-измерительных систем и проведено сравнение прогнозных данных с реальными временными рядами по ретроспективным данным.

Все рассмотренные математические модели процесса функционирования погружного оборудования для добычи нефти рассматривают штанговую колонну как прямую линию либо простую кривую. В то же время, согласно результатам исследований [8], поскольку движению насосно-компрессорных труб в радиальном направлении препятствует обсадная колона, она в процессе деформации и смещения вверх вынуждена складываться в спираль как наиболее доступную форму деформации, что наблюдается на практике. Параметры спиралевидности рассчитывались в работах [54, 55], однако они носят разобщённый и несистематический характер.

Таким образом, при построении математической модели процесса деформирования штанговой колонны необходимо решить следующие задачи:

- построения параметрического представления спиралевидной колонны с учетом количества витков, длины, параметров колонны труб, которая ограничивает рассматриваемую спиралевидную линию с учетом конфигурации скважины;
- построения модели процесса колебаний штанговой глубинно-насосной установки в процессе запуска и в установившемся режиме работы с учетом сопротивления среды;
- расчета параметров напряженно-деформированного состояния штанговой колонны с учетом деформирования после приобретения спиралевидной конфигурации оси.

1.4. Анализ методов и технических средств диагностирования ГНШУ

Проведенный анализ современного состояния методов и технических средств диагностирования показывает, что существующие системы сбора и

обработки данных для скважин, оборудованных ГНШУ, ориентированы на решение задач:

- сбора данных с целью их визуальной оценки на месте и последующей детальной обработки с использованием компьютерной техники [56, 57];
- контроля периодического режима откачки малодебитных скважин, как правило, в автоматическом режиме [58, 59, 60, 61, 62];
- всестороннего анализа измерительной информации от значительного количества стационарно размещенных датчиков (нагрузки, уровня жидкости в затрубном пространстве, мощности приводного электродвигателя, дебита скважины) с целью оптимизации режимов работы ГНШУ [63, 64]. При этом отсутствуют сведения о наличии достаточно простых и недорогих средств динамометрирования с возможностью автоматического диагностирования технического состояния ГНШУ.

В настоящее время наиболее распространенным является метод диагностирования ГНШУ по динамограмме, который, как правило, включает следующие этапы: снятие динамограммы с помощью гидравлического динамографа, ручная обработка (расшифровка) динамограммы, принятие решения о техническом состоянии скважины и необходимых мероприятиях по устранению дефектов, и, наконец, реализация принятых решений, причем все этапы выполняются разными людьми. Таким образом, между моментом получения диагностической информации и моментом принятия мер, направленных на устранение дефектов, проходит достаточно много времени, которое негативно отражается на показателях эффективности эксплуатации нефтедобывающих скважин. В этой связи существует необходимость разработки и внедрения автоматизированных систем диагностирования ГНШУ, которые должны обеспечивать выдачу оператору рекомендации об остановке скважины в случае наличия опасного дефекта или полной потери работоспособности, а также упростить оценку технического состояния и выявления дефектов и причин, которые их определяют.

Среди методов, обеспечивающих собственно диагностирование (отнесение технического состояния ГНШУ к одному из известных классов) можно указать следующие.

1. Метод полуавтоматического распознавания дефектов [65] предусматривает определение координат семи характерных точек со следующим обчислением ряда теоретических и фактических параметров динамограммы, за соотношениями между которыми происходит определение технического состояния ГНШУ. Метод требует знания около 120 параметров скважины и может быть непосредственно применен лишь для тихоходных режимов работы. Применение этого метода к динамограмме со значительной динамикой вызывает определенные сложности, поскольку понятие “положения характерной точки” в применении к такой динамограмме не является четко определенным, что не способствует разработке достаточно стойких алгоритмов поиска этих точек.

2. Детерминированно-статистический метод [66] в качестве исходного информативного признака использует длины нормалей между точками, расположенными на боковых сторонах квадрата, в который вписывается динамограмма, и соответствующими точками на линиях восприятия и снятия нагрузки на динамограмме. Полученная последовательность раскладывается в ряд по заданной системе функций, причем эти функции задаются на основе некоторого оптимального критерия качества, которое определяется за статистическими свойствами учебной выборки. На основе полученных коэффициентов расписания происходит определение технического состояния на основе распознавания образов. Метод позволяет различить лишь 4 класса технического состояния ГНШУ (нормальная работа, вытек в нагнетательной части, вытек в приемной части, незаполнение насоса). Как и вышеописанный метод, он предусматривает предварительное выделение на динамограмме участков восприятия и снятия нагрузки.

3. Метод автоматического распознавания неисправностей [65]

заключается в вычислении 12 признаков на основе проекций векторов, которые соединяют характерные точки исследуемой и эталонной динамограмм. Эталонная динамограмма, измеренная при условиях нормальной работы ГНШУ, сглаживается, аппроксимируется четырьмя параболическими кривыми и сохраняется в памяти в виде 12 коэффициентов этих кривых. Аналогичные действия проводятся над исследуемой динамограммой. Достоверность этого метода в значительной мере зависит от точности определения характерных точек, что особенно сложно для динамограмм со значительной динамикой, то есть для расширения области применения метода необходим предварительный пересчет наземной динамограммы в плунжерную.

4. Метод разностной кривой [67] базируется на свойстве симметрии участков хода вверх и вниз для динамограммы нормальной работы ГНШУ. Диагностическим признаком является количество и длина интервалов знакопостоянства разностной кривой, которая получается путем вычитания участка динамограммы при движении вверх от инвертированного участка хода вниз, причем за нулевые уровни приняты уровни исходных точек соответствующих участков. Метод позволяет в известной мере компенсировать искажающее влияние динамических нагрузок и обеспечивает распознавание основных классов неисправностей насосного оборудования (хотя, например, состояния “обрыв штанг” и “прихват плунжера” не идентифицируются) и приблизительную оценку коэффициента наполнения глубинного насоса. Однако, по результатам испытаний метода, приведенных [65], вероятность правильного распознавания состояния составляет 68 %, что недостаточно для практического применения.

5. Спектральный метод распознавания, которое использует для формирования вектора признаков коэффициенты расписания сигнала нагрузки в спектр Фурье, был впервые предложен в [68]. В работе [69] предлагается совершенствование этого метода, причем инвариантность к

параллельному переносу и изменению масштабов осей координат обеспечивается путем деления коэффициентов амплитудного спектра на амплитуду первой гармоники сигнала и сдвига коэффициентов фазового спектра относительно фазы первой гармоники в соответствующее число раз. В качестве меры подобия используется евклидово расстояние между исследуемыми и эталонными векторами признаков. Приведены расчеты, выполненные лишь для трех основных классов динамограмм, кроме того, не описано, каким образом формируются эталонные классы и не отражено влияние зависимости формы динамограммы от эксплуатационных параметров ГНШУ на достоверность распознавания.

6. Метод определения состояния ГНШУ на основе экспертной диагностики [16] в качестве диагностических признаков использует два коэффициента, которые рассчитываются как соотношение действительных и номинальных максимальных нагрузок и времени наработки. Состояние установки определяется как “хорошо” или “удовлетворительно” в зависимости от положения точки в двумерном пространстве этих признаков, причем дискриминант функции алгоритма распознавания вычисляется за адаптивным алгоритмом метода потенциальных функций в плоскости признаков. Очевидным недостатком метода является невозможность определения конкретных дефектов, хотя в принципе он может быть применен для решения другой задачи – прогнозирования технического состояния ГНШУ.

7. Вибрационный метод диагностирования ГНШУ [70], который использует отношение логарифмических декрементов затухания автокорреляционной функции вибрационного сигнала на интервалах восприятия и снятия нагрузки в качестве показателя запаса работоспособности ГНШУ обладает многими свойствами предыдущего рассмотренного метода. Метод основывается на зависимости характера автокорреляционной функции от шумовых свойств сигнала, которые, в свою

очередь, определенным образом зависят от степени сноса оборудования, на основании чего диагностический признак служит числовой характеристикой степени сноса.

Все перечисленные методы имеют ограничение или по количеству состояний, которые распознаются, или по допустимой степени динамического режима эксплуатации ГНШУ, которая обеспечивает необходимую достоверность распознавания.

Современные технические средства реализации рассмотренных выше методов построены преимущественно по принципу измерения деформаций чувствительного элемента с помощью тензорезистивных датчиков. В настоящее время существуют разнообразные конструкции устройств динамометрирования, которые используются как автономно для оперативной диагностики ГНШУ, так и стационарно устанавливаются на скважине и входят в состав автоматизированных систем управления процессом нефтедобычи. Достаточно часто в одном устройстве конструктивно объединены датчики нагрузки и перемещения.

Существующие конструкции датчиков нагрузки в соответствии с местом их установления можно разделить на следующие группы:

- 1) вставные между траверсами канатной подвески [56, 64, 71, 72, 73, 74, 75];
- 2) накладные на полированный шток [76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83];
- 3) накладные на балансир СК [33, 84];
- 4) накладные на канатную подвеску [85].

Поскольку в работе, исходя из поставленных задач основное внимание уделяется разработке датчика, работающего в составе системы диагностирования состояния ГНШУ, более подробно остановимся на анализе конструкций датчиков накладного типа.

Принцип действия датчика, накладного на полируемый шток, заключается в измерении поперечной деформации полируемого штока под

действием динамических нагрузок. Обзор патентов свидетельствует, что накладные датчики разрабатывались еще в 70-х гг. XX в., однако были ориентированы на измерение продольной деформации штока [76, 77], и не приобрели широкого распространения. Основная проблема при таком способе измерения заключается в том, что крепление датчика должно обеспечивать невозможность скольжения при продольной деформации колонны штанг, чего практически достичь сложно.

Поперечная деформация связана с продольной, которая является следствием нагрузки на колонну штанг, выражается через коэффициент Пуассона, который для стали составляет $\mu \leq 0,3$, потому чувствительность накладных датчиков лишь втрое меньше чувствительности вставных, при том, что их установка на объект проще и безопаснее. Однако для измерения нагрузок в абсолютных значениях с помощью такого датчика так же необходима операция разгрузки колонны штанг для определения веса штанг. В принципе вес штанг может быть рассчитан и теоретически, если известен динамический уровень жидкости в затрубном пространстве и конструкция колонны штанг, однако точный ее учет при построении динамограммы осложняется наличием трения и возможных дефектов насосного оборудования. Однако для диагностирования наиболее распространенных дефектов имеет значение, как правило, лишь форма динамограммы, воссоздание которой при использовании накладных на полируемый шток датчиков является так же гарантированным, как и для вставных динамографов. Типичная конструкция датчика накладного типа приведена на рис.1.4.

Деформация чувствительного П-подобного элемента измеряется с помощью тензорезисторов. Использование тензорезисторов уменьшает габаритные размеры механических узлов датчика и в большинстве случаев упрощает его конструкцию, но вместе с тем порождает и ряд проблем, среди которых низкая стойкость к действию паров и жидкостей, ползучесть, и т.п.

Для обеспечения точности измерений за рубежом используют полупроводниковые тензомостовые структуры, выполненные по интегральной технологии в условиях серийного производства.

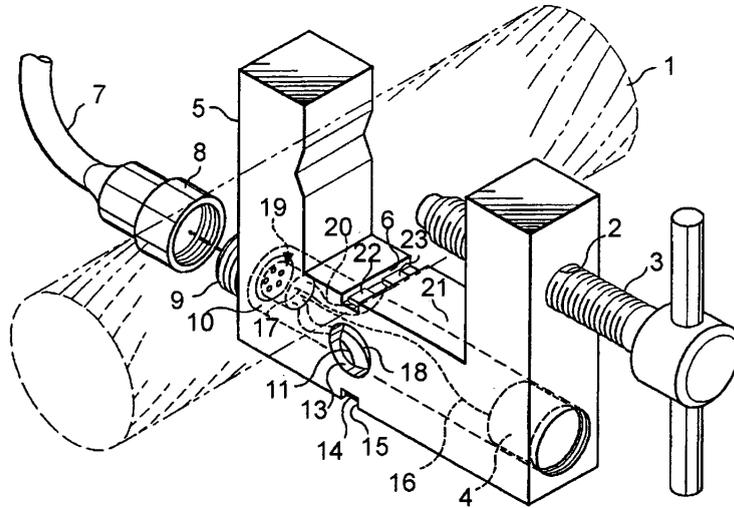


Рис. 1.4. Конструкция датчика накладного типа

В результате наличия прижимного винта (3) и резьбы в отверстии скобы (2) становится возможным использование одного и того же датчика для измерений на разных диаметрах полируемого штока (1). Как видно из рисунка, данная конструкция содержит слабительное отверстие – концентратор деформации (18) и акселерометр (4), с помощью которого можно измерять перемещения полируемого штока во времени с помощью двойной интеграции по времени снятого с него сигнала. Сигналы нагрузки и ускорения передаются на микропроцессорный блок обработки информации с помощью соединительного кабеля (7), который подсоединяется к скобе с помощью разъема (8, 9). В нижней части корпуса П-подобной скобы (5) сделано отверстие (10), через которое проводятся соединительные проводники к тензорезисторам и акселерометру. Как показывает практический опыт разработки датчиков такого типа, существует проблема ослабления резьбового соединения во время процесса измерения, которое приводит к дополнительной погрешности. Для устранения такого явления

необходимы дополнительные меры, среди которых может быть применено фиксирование винта, путем размещения дополнительной пружины на нем (3), или применения контргайки, также размещенной на винте. Последний способ менее удобен в использовании, однако более четко фиксирует винт, предотвращая ослабление резьбового соединения.

Характеристики некоторых накладных датчиков нагрузки приведены в табл.1.3. Все эти устройства предназначены для оперативного контроля технического состояния ГНШУ и имеют приблизительно одинаковые функциональные возможности: измерение и запись динамограмм в память устройства, вывод динамограммы на жидкокристаллический индикатор и передачу данных к компьютеру. Устройства ДН-9 [78], Микон-101 [79] и УДС-25ДЭ [80] содержат, кроме динамографа, эхолот для измерения уровня жидкости в затрубном пространстве.

Для обоих рассмотренных типов динамографов измеряемые деформации достаточно незначительными (например, для датчиков накладного типа при диаметре полируемого штока 22 мм деформация от нагрузки в 1 тонну будет составлять около 1 мкм), в связи с чем, их разрешающая способность по нагрузке ограничивается погрешностями, которые вносятся измерительной частью.

Фирмой САС Inc. (США), которая известна разработкой контролеров для управления работой ГНШУ (Model 2000 RPC, Model 8800 RPC, EXS-1000 ROC, CS7X) [73], изготавливаются как междутраверсные датчики нагрузки, так и накладные на полированный шток [74]. Для накладного датчика приведенная погрешность составляет 0,5–1% в диапазоне температур -50+100°С. Для связи с контроллером используется протокол MODBUS или собственный протокол САС 8500 или САС 8800 в зависимости от типа контролера.

Таблица 1.3

Характеристики накладных датчиков нагрузки

Датчик	Производитель	Диапазон измерений	Погрешность	Масса (габариты)
ДН-9	Интек	50 т	допустимая граница приведенной погрешности 5% (разрешающая способность 10 кг)	500×300×140
Микон 101-00		12 т	допустимая граница приведенной погрешности 5 %	7,6 кг
УДС-25-1	В-1336	10т	допустимая граница приведенной погрешности 1,5 %	8 кг
СИДД ОС	ТНПВО “Сиам”	10 т	разрешающая способность 10 кг	2,8 кг
(Beam Sensor)	САС	не вказ.	приведенная погрешность 0,5...1,0 %	не указ.

Подытоживая изложенную информацию, можно сделать следующие выводы:

1) каждая из рассмотренных конструкций датчиков нагрузки имеет определенные преимущества и недостатки, которые определяют подавляющую область их применения: для оперативного контроля – накладные на полированный шток или канатную подвеску (последние менее распространены), а также межтраверсные и традиционные гидравлические;

для стационарных систем контроля технического состояния и управления процессом нефтедобычи – накладные на балансир или межверсные;

2) наивысшую точность при измерениях нагрузки обеспечивают сейчас межверсные динамографы, которые также позволяют получить динамограмму в абсолютных значениях, в отличие от датчиков всех других типов;

3) аппаратно-программное обеспечение современных устройств динамометрирования включает: а) совокупность датчиков и первичных преобразователей; б) микропроцессорный модуль для организации процедуры измерения, хранения и индикации результатов и передачи данных в ПК; в) программное обеспечение ПК для приема и обработки измерительной информации и интеграции результатов обработки в глобальных АСУ нефтепромыслов;

4) существует тенденция к созданию комплексных систем и устройств, которые обеспечивают одновременное измерение нескольких величин (динамограмма/уровень, динамограмма/ваттметрограмма и т.д.).

1.5. Обоснование и выбор направления исследований

Проведенный анализ современного состояния диагностирования ГНШУ в процессе эксплуатации показал, что, несмотря на кажущуюся простоту конструкции ГНШУ, имеют место многочисленные отказы и аварии, обусловленные сложными условиями эксплуатации ГНШУ, когда штанговая колонна находится под действием комплекса силовых факторов, создающих растягивающие, изгибающие и вращающие напряжения. Преобладающее количество аварий – это обрывы штанг по телу, по муфте, обрыв полированного штока и др., причем их количество постоянно возрастает, особенно при эксплуатации наклонных и наклонно-направленных скважин. Практика эксплуатации ГНШУ в наклонных и наклонно-

направленных скважинах показывает, что действие комплекса силовых факторов на штанговую колонну приводит к образованию спиралевидной формы штанговой колонны, увеличению сил трения о стенки НКТ, изменению длины хода плунжера, повышенным вибрациям и т.п. и, как следствие – обрыву штанговой колонны, появлению сквозных отверстий в колонне НКТ, потере подачи ГНШУ, отвороту штанг и др.

Использование в этих случаях общепринятых динамометрических методов диагностирования с целью определения технического состояния ГНШУ дает значительную погрешность, а в отдельных случаях – постановку неправильного диагноза при распознавании динамограмм и отнесении их к заранее определенным классам дефектов. Это обусловлено отсутствием математических моделей, описывающих: процессы деформирования штанговой колонны с учетом изменения пространственной конфигурации ее оси; динамические процессы, с учетом сил сопротивления, обусловленных приобретением спиралевидной конфигурации ее оси; процессы колебаний ГНШУ с учетом неоднородности среды и действующих режимов работы граничных участков и др. Создание указанных моделей позволит разработать методы контроля состояния штанговой колонны, а уже на их основе – эффективные алгоритмы диагностирования состояния ГНШУ с использованием общепринятых динамометрических методов. На основании изложенного в работе планируется решить следующие задачи:

1. Разработать теоретические предпосылки метода контроля состояния штанговой колонны, находящейся под действием комплекса силовых факторов.
2. Исследовать влияние состояния штанговой колонны, находящейся под действием комплекса силовых факторов, на достоверность диагностирования ГНШУ динамометрическими методами.

3. Разработать технические средства и микропроцессорную систему на основании усовершенствованного алгоритма диагностирования по динамограмме.
4. Провести промышленную апробацию метода контроля штанговой колонны, находящейся под действием комплекса силовых факторов.

РАЗДЕЛ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ШТАНГОВОЙ КОЛОННЫ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПЛЕКСА СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ

2.1. Общая модель процесса деформирования в скважине с криволинейной осью

Вопросы оценки технического состояния штанговой колонны глубинно-насосных установок для добычи нефти (ГНШУ) могут быть решены с учетом информации о поведении колонны вдоль скважины, поскольку в процессе эксплуатации колонны под действием сил различной природы, которые в большинстве случаев не могут быть формально описаны некоторыми аналитическими соотношениями, имеет место потеря устойчивости колонны с образованием спиралевидной конфигурации оси колонны [54, 86, 87]. Математическое моделирование процесса деформирования колонны позволяет рассмотреть многие возможные пространственные конфигурации как самой колонны, так и скважины, в которой она находится, поскольку в общем случае скважина не является прямолинейной. Аппаратными исследованиями возможно определение пространственной конфигурации оси скважины в проекциях на оси декартовой системы координат, при этом определяются координаты некоторого множества точек $O(x_i, y_i, z_i)$.

Применяя интерполяционные или аппроксимационные процедуры, можно восстановить аналитическое представление оси скважины по всей её длине, поэтому при моделировании пространственного положения этого

объекта можно считать, что ось скважины задаётся некоторой линией с радиус-вектором каждой точки [88]:

$$\vec{r}_0 = \begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad 0 \leq t \leq t_0, \quad (2.1)$$

где \vec{r}_0 – радиус-вектор точки на оси скважины;

x, y, z – декартовы координаты точки;

t – параметр кривой.

Длина скважины в таком случае может быть определена по формуле:

$$L = \int_0^{t_0} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt. \quad (2.2)$$

Поскольку после потери устойчивости колонна принимает спиралевидную конфигурацию, для радиус-вектора точки на оси колонны справедливо выражение:

$$\vec{r}_c = \vec{r}_0 + \vec{b}_0 R \cos(k, s) + \vec{n}_0 R \sin(k, s), \quad (2.3)$$

где $\vec{b}_0; \vec{n}_0$ – бинормаль и нормаль к оси скважины;

k – параметр, определяющий количество витков, совершаемое колонной до нижней границы скважины;

s – параметр, определяемый длиной дуги оси колонны:

$$ds = \int_0^t \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt, \quad (2.4)$$

R – величина, определяемая радиусом скважины.

В дальнейших расчётах производится замена переменных, вследствие чего \vec{r}_0 ; \vec{b}_0 ; \vec{n}_0 и $\vec{\tau}_0$ – вектор, касательный к оси колонны – рассматриваются как функции параметра s . Координаты \vec{n}_0 и \vec{b}_0 могут быть определены с помощью формул Френе-Серра:

$$\vec{\tau}_0 = \frac{d\vec{r}_0}{ds}; \quad \vec{n}_0 = \frac{1}{k} \frac{d^2\vec{r}_0}{ds^2}; \quad \vec{b}_0 = [\vec{\tau}_0 \times \vec{n}_0], \quad (2.5)$$

где K – кривизна кривой, определяемая по формуле:

$$K = \sqrt{\left(\frac{d^2x_0}{ds^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y_0}{ds^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z_0}{ds^2}\right)^2}, \quad (2.6)$$

а производная по параметру s определяется по формуле для некоторого вектора $\vec{f}(x_1(t), x_2(t), x_3(t))$:

$$\frac{d\vec{f}}{ds} = \frac{d\vec{f}/dt}{dt/ds} = \frac{d\vec{f}/dt}{\sqrt{\left(\frac{dx_1}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dx_2}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dx_3}{dt}\right)^2}}. \quad (2.7)$$

Во многих практических задачах формулы для вычисления \vec{n}_0 и \vec{b}_0 могут быть существенно упрощены. Если перемещения оси осуществляются только вдоль оси O_y , то можно применять:

$$\vec{\tau}_0 = \{1, y'(x); 0\}; \quad \vec{n}_0 = \{0; 0; 1\}; \quad \vec{b}_0 = \left\{ \frac{y'(x)}{\sqrt{1+y'(x)^2}}; \frac{1}{\sqrt{1+y'(x)^2}}; 0 \right\}. \quad (2.8)$$

Формула (2.3) определяет радиус-вектор оси колонны. Если же необходимо рассмотреть деформацию колонны как деформируемого твёрдого тела, необходимо построить в любой момент времени радиус-

вектор точки колонны в указанной системе координат \vec{r}_p с использованием методики, разработанной в [89]:

$$\vec{r}_p = \vec{r}_c + \rho(s, \varphi, r, t) (\cos \omega(s, \varphi, r, t) \vec{b}_c + \sin \omega(s, \varphi, r, t) \vec{n}_c) + \psi(s, \varphi, r, t) \vec{r}_c, \quad (2.9)$$

где \vec{r} , \vec{n} , \vec{b} – касательная, нормаль и бинормаль к оси колонны, вычисляемые с учётом (2.5), а также формул:

$$\frac{d\vec{r}}{ds} = k\vec{n}; \quad \frac{d\vec{n}}{ds} = -k\vec{r} + \vec{v}\vec{b}; \quad \frac{d\vec{b}}{ds} = -\vec{v}\vec{n}, \quad (2.10)$$

где ν – кручение кривой:

$$\nu = \frac{1}{k^2} \begin{vmatrix} \frac{dx}{ds} & \frac{dy}{ds} & \frac{dz}{ds} \\ \frac{d^2x}{ds^2} & \frac{d^2y}{ds^2} & \frac{d^2z}{ds^2} \\ \frac{d^3x}{ds^3} & \frac{d^3y}{ds^3} & \frac{d^3z}{ds^3} \end{vmatrix} \quad (2.11)$$

Формулы (2.10) позволяют получить более компактные представления для векторов, входящих в (2.9). В тех случаях, когда \vec{n} ; \vec{b} ; \vec{r} определяются более простыми формулами, например, зависимостями (2.8), производные типа (2.10) вычисляются путем формального дифференцирования соответствующих функций, задающих указанные векторы.

Функции в (2.9): $\omega(s, \varphi, r, t)$; $\rho(s, \varphi, r, t)$; $\psi(s, \varphi, r, t)$ задают изменения геометрической конфигурации колонны в пространстве: $\omega(s, \varphi, r, t)$ – тангенциальные перемещения по полярному углу φ ; $\rho(s, \varphi, r, t)$ – перемещения вдоль радиальной координаты r ; $\psi(s, \varphi, r, t)$ – продольные перемещения вдоль координаты s по длине колонны. Задание этих функций каким-либо путём определяет трёхмерные перемещения тела. Учитывая формулы (2.10), можно записать:

$$\begin{cases} \vec{\tau}_c = \vec{\tau}_0(1 - K_0 R \sin(K, S)) + \vec{n}_0(-\nu_0 R \cos(K, S) + RK_1 \cos(K, S)) + \\ + \vec{b}_0(\nu_0 R \sin(K, S) - K_0 K_1 R \sin(K, S)) \\ \vec{n}_c = \frac{1}{K_c} \vec{n}_0(K_0 A + \frac{dB}{dS} - \nu_0 C) + \frac{1}{K_c} \vec{\tau}_0(\frac{dA}{dS} - K_0 B) + \frac{1}{K_c} \vec{b}_0(\nu_0 B + \frac{dC}{dS}), \\ \vec{b}_c = [\vec{\tau}_c \times \vec{n}_c] \end{cases} \quad (2.12)$$

где $K_0; \nu_0$ – кривизна и кручение оси скважины;

K_c – кривизна оси колонны;

для величин A, B, C справедливы следующие соотношения (с учётом зависимостей в первом выражении в (2.12)):

$$\begin{cases} A = 1 - K_0 R \sin(K_1 S), \\ B = R \cos(K_1 S) \cdot (K_1 - \nu_0), \\ C = R \nu_0 K_1 \sin(K_1 S). \end{cases} \quad (2.13)$$

Для определения деформации колонны рассчитываются компоненты векторов ковариантного базиса $\vec{\mathcal{E}}_r; \vec{\mathcal{E}}_s; \vec{\mathcal{E}}_\varphi$;

$$\begin{cases} \vec{\mathcal{E}}_s = \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial S} = \vec{\tau}_c \left(\frac{\partial \psi}{\partial S} + 1 - \rho K_c \sin \omega \right) + \vec{b}_c \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \cos \omega - \rho \frac{\partial \omega}{\partial S} \sin \omega + \right. \\ \left. + \rho \nu_c \sin \omega \right) + \vec{n}_c \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \cos \omega - \nu_c \rho \cos \omega + K_c \psi \right), \\ \vec{\mathcal{E}}_\varphi = \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial \varphi} = \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \vec{\tau}_c + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \cos \omega - \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \rho \sin \omega \right) \vec{b}_c + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \sin \omega + \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \cos \omega \right) \vec{n}_c, \\ \vec{\mathcal{E}}_r = \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial r} = \frac{\partial \psi}{\partial r} \vec{\tau}_c + \left(\frac{\partial \rho}{\partial r} \cos \omega - \frac{\partial \omega}{\partial r} \rho \sin \omega \right) \vec{b}_c + \left(\frac{\partial \rho}{\partial r} \sin \omega + \frac{\partial \omega}{\partial r} \cos \omega \right) \vec{n}_c, \end{cases} \quad (2.14)$$

где K_c, ν_c – кривизна и кручение оси колонны.

С учетом (2.14), ковариантные компоненты метрического тензора, определяемые по формулам [90]:

$$g_{ij} = \vec{Y}_i \cdot \vec{Y}_j; \quad i, j = s, \varphi, r, \quad (2.15)$$

что приводит к следующим соотношениям [91]:

$$g_{ss} = \left(\frac{\partial \psi}{\partial S} + 1 - \rho K_c \sin \omega \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \cos \omega - \rho \frac{\partial \omega}{\partial S} \sin \omega + \rho v_c \sin \omega \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \sin \omega + \rho \frac{\partial \omega}{\partial S} \cos \omega - \rho v_c \cos \omega + K_c \psi \right)^2, \quad (2.16)$$

$$g_{\varphi\varphi} = \left(\frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \cdot \cos \omega - \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \cdot \rho \sin \omega \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \cdot \sin \omega + \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \cdot \rho \cos \omega \right)^2, \quad (2.17)$$

$$g_{rr} = \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial r} \cdot \cos \omega - \frac{\partial \omega}{\partial r} \cdot \rho \sin \omega \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial r} \cdot \sin \omega + \frac{\partial \omega}{\partial r} \cdot \rho \cos \omega \right)^2, \quad (2.18)$$

$$g_{s\varphi} = \left(\frac{\partial \psi}{\partial s} + 1 - \rho k_c \sin \omega \right) \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial s} \cdot \cos \omega - \rho \cdot \frac{\partial \omega}{\partial s} \cdot \sin \omega + \rho v_c \cdot \sin \omega \right) \times \left(\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \cdot \cos \omega - \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \cdot \rho \sin \omega \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial s} \cdot \sin \omega + \rho \frac{\partial \omega}{\partial s} \cos \omega - v_c \rho \cdot \cos \omega + k_c \psi \right) \times \left(\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \cdot \sin \omega + \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \cdot \rho \cos \omega \right), \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned}
g_{sr} = & \left(\frac{\partial \psi}{\partial s} + 1 - \rho k_c \sin \omega \right) \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial s} \cdot \cos \omega - \rho \cdot \frac{\partial \omega}{\partial s} \cdot \sin \omega + \rho v_c \cdot \sin \omega \right) \times \\
& \times \left(\frac{\partial \rho}{\partial r} \cdot \cos \omega - \frac{\partial \omega}{\partial r} \cdot \rho \sin \omega \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial s} \cdot \sin \omega + \rho \frac{\partial \omega}{\partial s} \cos \omega - v_c \rho \cdot \cos \omega + k_c \psi \right) \times \\
& \times \left(\frac{\partial \rho}{\partial r} \cdot \sin \omega + \frac{\partial \omega}{\partial r} \cdot \rho \cos \omega \right), \quad (2.20)
\end{aligned}$$

$$g_{r\varphi} = \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho^2 \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial r}. \quad (2.21)$$

Указанные компоненты вычисляются в начальный и конечный моменты времени. При условии, что функции $\rho(s, \varphi, r, t)$; $\omega(s, \varphi, r, t)$; $\psi(s, \varphi, r, t)$ являются известными, на основании конкретных компонент матричного тензора можно определить компоненты тензоров деформаций и напряжений. В том случае, когда указанные функции неизвестны, для их определения используется либо решение системы уравнений теории упругости в перемещениях в рамках модели изотропного или анизотропного деформируемого упругого твердого тела, либо задача сводится к нахождению экстремума функции нескольких переменных, полученной при приближенном решении задачи теории упругости с использованием одного из известных проективных методов [92].

В качестве начального положения колонны рассматривается такая конфигурация её оси, при которой ось колонны совпадает с осью скважины – при этом спиралевидность колонны в начальный момент отсутствует. Для определения конфигурации оси в контрольный момент времени необходимо задать способ определения параметра K , после чего вычисление деформаций производится по известной формуле [92]:

$$\varepsilon_{ij} = (g_{ij} - g^0_{ij}), \quad (2.22)$$

где ε_{ij} – компоненты тензора деформаций;

g_{ij} и g^o_{ij} – компоненты метрического тензора, определяемые по (2.16) – (2.21) соответственно в контрольный и начальный моменты времени.

Оценка напряжений может быть произведена в рамках модели изотропного или анизотропного упругого тела с использованием закона Гука:

$$\begin{cases} \sigma^{ij} = \lambda I_1(\varepsilon) \rho^{ij} + 2\mu \varepsilon^{ij}, \\ I_1(\varepsilon) = \sum_{i,j=1}^3 \varepsilon_{ij} g^{ij}, \end{cases} \quad (2.23)$$

где λ, μ – параметры Ламе материала;

$I_1(\varepsilon)$ – первый инвариант тензора деформаций;

g^{ij} – контравариантные компоненты метрического тензора, определяемые как компоненты матрицы, обратной к матрице, составленной из компонента g^{ij} ;

σ^{ij} – контравариантные компоненты тензора напряжений.

Использование (2.23) не позволяет учитывать пластические эффекты, однако при эксплуатации колоны пластические деформации являются ненормативными, недопустимыми в процессе эксплуатации объекта.

2.2. Определение количества витков спирали штанговой колонны по ее оси после потери устойчивости

Существуют различные способы определения параметра K_l , который характеризует удельное количество витков стержня на единицу длины колонны. Оценочные значения указанной величины могут быть получены,

например, из следующих соображений: рассмотрим стержень, нагруженный осевой силой P , в предположении, что критическая сила $P_{кр}$ не вызывает в стержне напряжений, превышающих предел пропорциональности. Уравления изогнутой оси балки может быть записано в виде [93]:

$$EI_{\min} \frac{d^2 w(z)}{dz^2} = M(z) \quad (2.24)$$

где E – модуль Юнга материала;

I_{\min} – момент инерции в сечении, где он принимает минимальное значение;

$M(z)$ – изгибающий момент:

$$M(z) = -P\omega, \quad (2.25)$$

где $\omega(z)$ – отклонение вертикальной оси. В таком случае, решая (2.24) с учётом (2.25) при граничных условиях:

$$\alpha(z)|_{z=0} = 0; \alpha(z)|_{z=L} = 0, \quad (2.26)$$

где L – длина стержня, моделирующего колонну штанг в прямолинейной скважине.

Можно получить общее решение в виде:

$$\omega = A \sin \omega_0 z + B \cos \omega_0 z, \quad (2.27)$$

где $\omega_0^2 = \frac{P_{кр}}{EI_{\min}}$, а с учётом (2.26), в предположении, что решение не является

тождественным нулю, получается следующее соотношение:

$$\omega_0^2 l^2 = \pi^2 n^2, \quad (2.28)$$

где n – количество полувольт синусоиды, уместяющихся на длине изогнутого вследствие потери устойчивости стержня. Следует отметить, что при

обретении осью колонны штанг спиралевидной конфигурации, её проекцией на координатную плоскость будет именно синусоида, что позволяет использовать указанный подход для изучения спиралевидной колонны в качестве оценочного варианта расчёта её параметров.

Из (2.28) получается:

$$\frac{P_{кр}}{EI_{min}} = \frac{\pi^2 n^2}{l^2}, \quad (2.29)$$

откуда, с учетом того, что количество витков спирали равно $\tilde{K} = \frac{n}{2}$, получается соотношение:

$$\tilde{K} = \frac{L}{2\pi} = \sqrt{\frac{P_{кр}}{EI_{min}}}, \quad (2.30)$$

откуда для удельного количества витков K_1 справедливо соотношение:

$$K_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_{кр}}{EI_{min}}}, \quad (2.31)$$

а для количества витков N на полной длине колонны L справедлива формула:

$$\tilde{K} = N = \frac{l}{2\pi} \sqrt{\frac{P_{кр}}{EI_{min}}} \quad (2.32)$$

Полученная формула с достаточным для проведения инженерных расчетов уровнем точности сокращения совпадает с известными

соотношениями, полученными в работе [54], где при решении задачи о спиралевидном деформировании колонны под действием осевой нагрузки и момента кручения M для параметра N получено представление:

$$N = \frac{l}{2\pi} \left[\frac{M}{2EI} + \sqrt{\frac{0,66P}{EI_{min}} + \frac{0,126M^2}{E^2 I_{min}^2} - \frac{0,205M}{EI_{min}}} \cdot \sqrt{\frac{0,363M^2}{E^2 I^2} + \frac{1,33P}{EI_{min}}} \right] \quad (2.33)$$

В том случае, когда ось скважины является прямолинейной, формула (2.1) может быть записана в виде:

$$\vec{r} = \begin{cases} x = s, \\ y = r(s) \sin k_1 s, \\ z = r(s) \cos k_1 s, \end{cases} \quad 0 \leq s \leq l. \quad (2.34)$$

где $r(s)$ – величина, определяемая диаметром колонны труб, в которых помещается колонна насосно-компрессорных штанг;

$0 \leq r(s) \leq R$, где R – радиус колонны труб.

Рассмотрим случай, когда $r(s) = r = const$ – ось скважины является прямолинейным цилиндром постоянного радиуса. В этом случае можно предложить алгоритм практического определения величин K_1 и N . По количеству секций колонны насосно-компрессорных штанг можно определить длину L_1 линии после потери устойчивости. С другой стороны, с использованием представления (2.34) и формулы (2.2) в предположении $r(s) = const = r$ можно получить [87]:

$$L_1 = L \sqrt{1 + r^2 k_1^2}, \quad (2.35)$$

где L – длина прямолинейной скважины.

Выражая величину k_1 из (2.35) получаем:

$$k_1 = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L_1^2 - L^2}{L^2}}, \quad (2.36)$$

откуда, принимая во внимание, что

$$k_1 = \frac{2\pi N}{L}, \quad (2.37)$$

получаем:

$$N = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{L_1^2 - L^2}. \quad (2.38)$$

Таким образом, исходя только из геометрических соображений, можно определить количество витков спирали. Для практического применения приведенной формулы необходимо учитывать, что величина L_1 определяется по количеству использованных звеньев колонны, тогда как для определения длины прямолинейной скважины L требуется использование аппаратных методов оценки ее глубины.

2.3. Моделирование процесса колебаний штанговой колонны в процессе запуска и в установившемся режиме работы ГНШУ

При изучении работы штанговой глубинно-насосной установки (ШГНУ) и анализе статистических данных об авариях можно сделать вывод о том, что большинство аварий происходит в начальный период

функционирования объекта. Проблеме оценки технического состояния ШГНУ посвящен цикл исследований, при этом рассмотрены различные факторы, влияющие на возникновение и распространение дефектов ШГНУ, среди которых можно выделить конструкторские просчеты, человеческий фактор, технологические особенности и эксплуатационные факторы [15, 44, 95]. Экспериментальные исследования этих объектов сопряжены с целым рядом технических трудностей, так как невозможно оценить особенности пространственной конфигурации скважины, колонны труб штанговой установки, месторасположение зон контакта ШГНУ со стенками скважин, поэтому методы математического моделирования остаются одним из основных методов оценки технического состояния ШГНУ.

При построении математической модели процесса колебаний ШГНУ принимаются следующие гипотезы [94, 96]:

- закон изменения возбуждающей силы считается известным, он определяется технологическими режимами эксплуатации ШГНУ;

- учитывается сопротивление движению установки, коэффициент сопротивления рассматривается либо постоянным, либо зависящим от времени и координаты вдоль установки;

- в процессе запуска установки задача рассматривается в двух средах – жидкой и газообразной, моделируется движение границы раздела фаз, в которых осуществляется движение колонны.

Исходя из приведенных гипотез, необходимо:

- найти решение задачи:

$$\begin{cases} a_1^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2}, \\ a_2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 U_2}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial U_2}{\partial t}; \end{cases} \quad (2.39)$$

- при наличии граничных и начальных условий вида:

$$U_1(0, t) = F_1(t), \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial t}(0; t) = V_1(t), \quad (2.41)$$

$$U_1(L - S(t), t) = U_2(L - S(t), t), \quad (2.42)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial U_1}{\partial t}(L - S(t), t) = \frac{\partial U_2}{\partial t}(L - S(t), t), \\ U_2(L, t) = R_1(t), \\ \frac{\partial U_2}{\partial t}(L, t) = R_2(t), \end{cases} \quad (2.43)$$

где $U_1(x, t)$, $U_2(x, t)$ – перемещение точек колонны в направлении вдоль оси в газообразной и жидкой средах соответственно;

$a^2 = \frac{E}{\rho}$; ρ – плотность материала ШГНУ;

α – коэффициент трения между материалом ШГНУ и средой;

$F_1(t)$ – известный режим колебаний верхней части ШГНУ;

$V_1(t)$ – скорость движения верхней границы колонны;

$S(t)$ – режим заполнения установки нефтью, который моделируется в виде закона изменения уровня жидкости во времени.

Для функции $S(t)$ можно записать следующее аналитическое представление:

$$S(t) = \begin{cases} Si + \frac{Vt}{\pi R^2}, & (2i - 1)T \leq t \leq 2iT, \\ Si & (2i - 2)T \leq t \leq (2i - 1)T, i = 1, 2, \dots, N, \end{cases} \quad (2.44)$$

где N – количество качаний колонны до полного заполнения установки жидкостью;

S_i – уровень жидкости в установке в момент начала подъема очередного объема добываемой жидкости ($S_i = 0$);

$$\frac{Vt}{\pi R^2} = h - \text{величина изменения уровня жидкости на протяжении одного}$$

периода качания;

$R_1(t)$ – закон перемещения нижней границы установки;

$R_2(t)$ – закон изменения скорости верхней границы ШГНУ;

V – объемная скорость подачи жидкости насосом;

R – радиус скважины (колонны насосных труб);

T – период колебаний верхней части ШГНУ.

Закон изменения перемещения $R_1(t)$ и скорости $R_2(t)$ нижней границы ШГНУ определяется путем решения уравнения колебаний, которое может быть представлено в виде [97]:

$$m(t) \cdot y''(t) + (-A + By'^2)y' + Ky = 0, \quad y(0) = y_0, \quad y'(0) = y_0', \quad (2.45)$$

где $m(t)$ – масса погружного насоса и поднимаемой жидкости;

$y(t)$ – закон перемещения насоса в среде с сопротивлением;

$\lambda = (-A + By'^2)$ – коэффициент демпфирования;

A – постоянная составляющая коэффициента демпфирования;

B – коэффициент, который характеризует степень влияния на коэффициент демпфирования квадрата скорости движения насоса в скважинной жидкости;

K – коэффициент жесткости соединений.

В процессе эксплуатации колонны ее ось может приобретать спиралевидную конфигурацию это приводит к изменению параметров

колонны, при моделировании указанный эффект воспроизводится путем изменения величин λ и K в уравнении (2.45).

Аналитическая структура функции $m(t)$ может быть представлена в виде:

$$m(t) = \begin{cases} m_0, & (2i-2)T \leq t \leq (2i-1)T, \\ m_0 + S(t)\pi R^2, & (2i-1)T \leq t \leq 2iT, \end{cases} \quad (2.46)$$

где m_0 – масса погружного насоса;

$S(t)\pi R^2$ – масса погружаемой жидкости.

Такой вид функции $m(t)$ обусловлен режимом подъема жидкости и обратного хода штанговой колонны. Знак λ будет определять характер колебаний; при $\lambda < 0$ колебания носят возбуждающийся характер. Величина

$$\lambda = -A + By'^2 \quad (2.47)$$

позволяет моделировать ситуацию, которая характеризуется изменением закона колебаний. Записывая (2.45) в упрощенной форме:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda \frac{dy}{dt} + ky = 0, \quad (2.48)$$

можно сделать некоторые выводы о частоте и характере колебаний ШГНУ в зависимости от значения коэффициентов, входящих в (2.48).

Характеристическое уравнение для (2.48) имеет корни:

$$P = \frac{-\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 4mk}}{2m}. \quad (2.49)$$

Поскольку при изменении пространственной конфигурации оси ШГНУ возможен более частый контакт колонны штанг со стенками скважины (колонны труб), сопротивление движению ШГНУ увеличивается, а это значит, что, хотя колебания имеют затухающий характер по-прежнему, интенсивность затуханий увеличивается.

Принимая во внимания, что коэффициент жесткости соединений имеет постоянное значение, или слабо изменяется во времени, существенное внимание на процесс колебаний имеет величина m , в зависимости от значения m величина (2.49) может иметь либо действительное, либо комплексное значение вида:

$$y(t) = c_1 e^{p_1 t} + c_2 e^{p_2 t}, \quad p_1 < 0, p_2 < 0, \quad (2.50)$$

при $\lambda^2 - 4mk = 0$:

$$y(t) = c_1 e^{p_1 t} + c_2 \cdot e^{p_1 t}, \quad (2.51)$$

а при $\lambda^2 - 4mk < 0$:

$$y(t) = e^{\frac{\lambda}{2m} t} (c_1 \sin(\omega_1 t) + c_2 \cos(\omega_2 t)). \quad (2.52)$$

Поскольку процесс, имеющий место в работе ШГНУ, является периодическим, закон, описывающий колебания объекта, должен иметь периодический характер, что может быть лишь в том случае, когда λ изменяется во времени, а величина $\lambda^2 - 4mk$ имеет либо отрицательный знак и тогда имеет место вариант формулы (2.52), либо периодичность колебаний в (2.50) и (2.51) достигается путем изменения знака λ . Связанные с моделью эффекты моделируются с использованием уравнения Ван-Дер-Поля [97], к

которому может быть сведено уравнение (2.45) при условии $m(t) = m_0 = const$. Рассматриваемый закон изменения $m(t)$ в форме (2.46) позволяет получить более точную модель процесса колебаний ШГНУ.

Таким образом, можно предложить следующий алгоритм решения задачи моделирования процесса колебаний ШГНУ:

- задаются функции $F_1(t), V_1(t)$ – на основании анализа реальных режимов работы ШГНУ;
- с целью получения неизвестных функций в (2.43) решается уравнение (2.45) с соответствующими начальными значениями и известными значениями коэффициентов $m(t); \lambda = -A + B\dot{y}^2; K$. В качестве $R_1(t)$ выступает решение $y(t)$ уравнения (2.45),

$$R_2(t) = y'(t);$$

- с использованием численных методов решается задача (2.39) в двух областях с подвижной границей. В том случае, когда имеет место условие

$$L - S(t) \leq 0, \tag{2.53}$$

процесс колебаний ШГНУ описывается с помощью только второго уравнения системы (2.39).

Таким образом, представленная математическая модель позволяет описать параметры колебаний ШГНУ в начале ее эксплуатации в процессе выхода ее на стационарный режим работы. Сформулированная система (2.39) и граничные условия (2.40)-(2.43) для моделирования процесса колебаний всей колонны позволяют описать продольные перемещения точек колонны функцией координаты и времени, что приводит к выводу о том, что имеют место деформации колонны, а, следовательно, и напряжения. Если решением системы (2.39) с условием (2.40)-(2.43) устанавливается закон изменения

перемещения $U(x,t)$, то, используя формулу для компонента тензора напряжений

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{11} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (2.54)$$

можно рассчитывать действующие в материале исследуемого объекта механические напряжения.

2.4. Моделирование напряженного состояния штанговой колонны с учетом ее винтовой конфигурации оси в вертикальной скважине

Как было сказано раньше, скважинная часть колонны после потери прямолинейной формы устойчивости укладывается в скважине по спирали, что приводит к существенному перераспределению действующих в материале напряжений. Для их количественной оценки необходимо построить модель процесса деформирования с учетом спиралевидной конфигурации деформируемой от объекта. Предполагается, что в начальный момент времени ось скважины и колонны имеет прямолинейную конфигурацию, что позволяет записать параметрическое представление объекта в цилиндрической системе координат путем описания радиус-вектора произвольной точки \vec{R} [98]:

$$\vec{R} = \begin{cases} x = r \cos \varphi, \\ y = r \sin \varphi, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad 0 \leq z \leq L_0, \quad 0_2 \leq r \leq R_{mp}, \\ z = z, \end{cases} \quad (2.55)$$

где L_0 – длина скважины;

R_{mp} – внешний радиус колонны.

В процессе деформирования оси колонны приобретает спиралевидную конфигурацию, поэтому параметрическое представление радиус-вектора точки изменяется:

$$Z = \begin{cases} x = R \cos K_1 z + f_1(r, \varphi, z), \\ y = R \sin K_1 z + f_2(r, \varphi, z), \\ z = z + f_3(r, \varphi, z), \end{cases} \quad (2.56)$$

где R – радиус скважин;

K_1 – параметр, определяющий количество витков спирали на единицу ее длины;

$f_i(r, \varphi, z)$, $i=1, 2, 3$ – формулы, определяющие деформацию сечений колонны.

Рассматривая случай недеформируемых сечений колонны, получим:

$$\begin{cases} f_1(r, \varphi, z) = r \cos \varphi, \\ f_2(r, \varphi, z) = r \sin \varphi, \\ f_3(r, \varphi, z) = 0. \end{cases} \quad (2.57)$$

Параметр K_1 в (2.56) определяется согласно (2.37) с учетом недеформируемой длины скважин

$$K_1 = \frac{2\pi N}{L_0}. \quad (2.58)$$

Компоненты локальных базисов в начальный $\tilde{\mathcal{E}}_i^0$ и контрольный $\tilde{\mathcal{E}}$ моменты вычисляются по формулам:

$$\begin{cases} \tilde{Y}_r^0 = \{\cos \varphi; \sin \varphi; 0\}, \\ \tilde{Y}_\varphi^0 = \{-r \sin \varphi; r \cos \varphi; 0\}, \\ \tilde{Y}_z^0 = \{0; 0; 1\}. \end{cases} \quad (2.59)$$

$$\begin{cases} \vec{Y}_r = \{\cos \varphi; \sin \varphi; 0\}, \\ \vec{Y}_\varphi = \{-r \sin \varphi; r \cos \varphi; 0\}, \\ \vec{Y}_z = \{-Ra \sin az; Ra \cos az; 1\}, \end{cases} \quad (2.60)$$

откуда можно установить формулы для вычисления компонент метрического тензора в два момента времени:

$$g_{rr}^\circ = 1; g_{\varphi\varphi}^\circ = r^2; g_{zz}^\circ = 1, g_{ij} = 0 \text{ при } i \neq j. \quad (2.61)$$

Компоненты с индексом 1 соответствуют координате r ; $2 \leftrightarrow \varphi$; $3 \leftrightarrow z$.

В контрольный момент времени :

$$\begin{cases} g_{11} = 1, \\ g_{22} = r^2, \\ g_{33} = R^2 k_1^2 + 1, \\ g_{12} = 0, \\ g_{13} = Rk_1 (-\sin k_1 z \varphi \cos \varphi + \cos z \sin \varphi) = Rk_1 \sin(\varphi - az), \\ g_{23} = Rk_1 r \cos(\varphi - k_1 z). \end{cases} \quad (2.62)$$

Используя формулы (2.61) и (2.62), для компонент тензора деформации получаем:

$$\begin{cases} E_{11} = 0, \\ E_{22} = 0, \\ E_{33} = \frac{1}{2} R^2 a^2, \\ E_{12} = \frac{1}{2} R a \sin(\varphi - az), \\ E_{23} = \frac{1}{2} R a r \cos(\varphi - az). \end{cases} \quad (2.63)$$

В рамках модели изотропного деформируемого тела компоненты тензора напряжений рассчитываются по формулам:

$$\begin{cases} \sigma^j = \lambda I_1(\varepsilon) g^j + 2\mu \varepsilon^j, \\ I_1(\varepsilon) = \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^3 E_{kj} g^j, \end{cases} \quad (2.64)$$

где $I_1(\varepsilon)$ – первый инвариант тензора деформаций;

g^j, E^j, σ^j – контравариантные компоненты соответствующих тензоров:

$$\begin{cases} \{g^j\} = \{g_j\}^{-1}, \\ \sigma^j = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 g^{jk} g^{jl} \sigma_{kl}, \\ \varepsilon^j = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 g^{jk} g^{jl} \varepsilon_{kl}. \end{cases} \quad (2.65)$$

Параметры λ и μ , называемые параметрами Ламе материала, вычисляются через известные характеристики модуля Юнга E и коэффициента Пуассона σ :

$$\lambda = \frac{\sigma E}{(1 - 2\sigma)(1 + \sigma)}; \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \sigma)}. \quad (2.66)$$

С учетом (2.63) для первого инварианта тензора деформаций $I_1(\varepsilon)$ получается формула:

$$I_1(\varepsilon) = \frac{1}{2} R^2 a^2. \quad (2.67)$$

Компоненты тензора напряжений рассчитываются по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma^{11} = \frac{1}{2} \lambda R^2 a^2, \\ \sigma^{12} = 0, \\ \sigma^{13} = \mu R a \sin(\varphi - az), \\ \sigma^{22} = \frac{1}{2} \lambda R^2 a^2 \frac{1}{r^2}, \\ \sigma^{23} = \mu r R a \cos(\varphi - az), \\ \sigma^{33} = \left(\frac{1}{2} \lambda + \mu \right) R^2 a^2. \end{array} \right. \quad (2.68)$$

Расчеты были проведены для числовых данных, взятых для скважины №6 НГДУ «Надворнаянефтегаз». Глубина скважины $L=2450$ м, диаметр колонны 73 мм, внутренний радиус колонны $R_{mp}=11$ мм. Модельные расчеты проведены для разных значений параметров K и L . Анализируя (2.68), можно сделать вывод о том, что из-за малых значений параметра r в формуле (2.68) для σ^{22} , именно эта компонента будет доминирующей среди всех компонент σ^j . На рис.2.1 приведена зависимость $\sigma^{22} = f(k)$, где σ^{22} – контравариантная компонента тензора напряжений; k – количество витков спиралевидной оси колонны штанг.

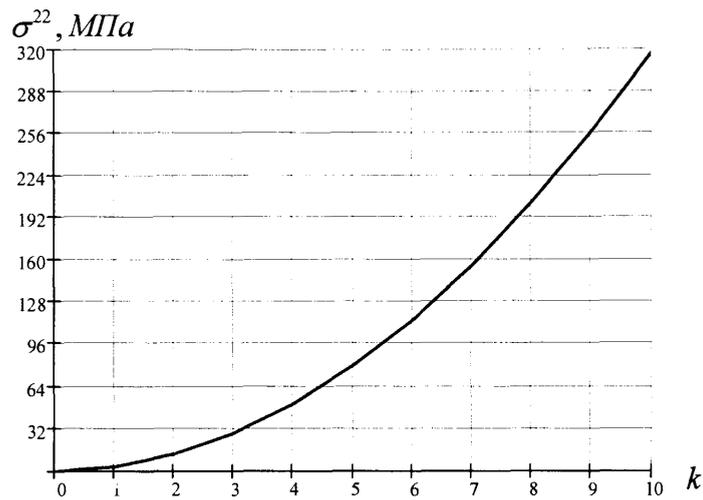


Рис. 2.1. Зависимость максимального напряжения σ^{22} от количества витков k при деформации штанговой колонны

Перейдя к физическим компонентам тензора напряжений, получим:

$$\sigma_{\phi}^{ij} = \sigma^{ij} \sqrt{g_{ii}} \sqrt{g_{jj}}. \quad (2.69)$$

Указанные компоненты более эффективно описывают реальные значения напряжений, поскольку они характеризуют напряжения в базисе, образованном единичными векторами.

Можно установить также зависимость между количеством витков спирали и реально действующими напряжениями, используя известные соотношения между количеством витков спирали и длиной колонны. Для указанных числовых данных для уровня физических напряжений $\sigma_{\phi_{max}}^{ij} = 300 \text{ МПа}$ количество витков составляет $N=580$ – то есть, при таком количестве витков обрыв колонны может произойти исключительно вследствие изменения геометрии колонны. При этом один виток приходится на 4,22 м по длине колонны. Очевидно, что в реально работающей установке, кроме указанных факторов изменения геометрии на колонну действует комплекс силовых факторов, а изменение числа витков спирали может привести к разному изменению сил трения, поскольку увеличивается сила

реакции со стороны стенок колонны труб. Поэтому реальные значения количества витков, опасные для критического изменения напряженно-деформированного состояния, могут быть значительно меньше установленного значения. При указанных данных длина колонны изменится на величину $\Delta L = L_1 - L$, где L – начальная длина колонны, L_1 – новая длина. Для определения длины используется формула [87]:

$$L_1 = \sqrt{L^2 + (2\pi k R_{mp})^2}. \quad (2.70)$$

Подставляя полученные данные и геометрические параметры колонны, получим, согласно (2.70) $L_1 = 2450,33$ м. Таким образом, при достижении критических напряжений фактическая длина колонны изменяется лишь на 0,33 м. Если заданы максимальные значения физических компонент (в данном случае это σ_{ϕ}^{33} в (2.68)), то:

$$\begin{cases} \sigma_{\phi_{\max}}^{jj} = \left(\frac{1}{2}\lambda + \mu\right) K^2 a^2, \\ \sigma_{\phi_{\max}}^{jj} = \left(\frac{1}{2}\lambda + \mu\right) R^2 \frac{4\pi^2 K^2}{L^2}, \end{cases} \quad (2.71)$$

откуда

$$K = \sqrt{\frac{\sigma_{\phi_{\max}}^{jj} L^2}{\left(\frac{1}{2}\lambda + \mu\right) R^2 4\pi^2}}. \quad (2.72)$$

С учетом (2.72), (2.71), (2.70) получим новые значения фактической длины колонны:

$$L_1 = L \sqrt{1 + \frac{\sigma_{\phi_{max}}^{ij}}{\frac{1}{2}\lambda + \mu} \left(\frac{R_{mp}}{R}\right)^2}. \quad (2.73)$$

Результаты тестовых расчетов позволяют сделать вывод о том, что изменение фактической длины колонны насосно-компрессорных штанг свидетельствует об изменении ее напряженного состояния. Причем для получения объективной информации об этом изменении необходимо в расчетных формулах использовать не контравариантные, а физические компоненты тензора напряжений.

2.5. Моделирование сил сопротивления, возникающих при движении штанговой колонны после потери ее устойчивости

При движении колонны штанг в скважине, заполненной нефтью, изменяется сила сопротивления движению, что может быть обусловлено изменением уровня жидкости, касанием колонны к стенке скважины, а также изменением пространственной конфигурации колонны вследствие потери продольной устойчивости и приобретения ею спиралевидной формы. Для определения качественного характера этого изменения может быть предложена следующая модель: при работе колонны до потери продольной устойчивости сила трения колонны может быть оценена по формуле:

$$F_{тр.}^0 = k_1 P, \quad (2.74)$$

где k_1 – коэффициент трения, зависящий от закона верхней и нижней границы, а также от скорости движения штанг в жидкости,

P – продольная сила, действующая на колонну. Если значения этой силы приобретают значения $P_{кр.}$ (2.29), колонна изменяет конфигурацию, укладываясь в спираль.

В этом случае можно предположить, что величина силы трения зависит от количества витков спирали, хотя в предельном варианте $N \rightarrow \infty$ эта сила является конечной величиной $F_{мп.}^{\infty}$. Исходя из (2.29), можно предположить, что сила трения зависит от величины N^2 :

$$\tilde{F}_{мп.} = (\mu + k_1) \cdot \frac{4\pi \cdot N^2 IE}{l^2}, \quad (2.75)$$

где μ – коэффициент трения между колонной штанг и колонной труб.

Таким образом, для установления зависимости между количеством витков колонны и силы трения, необходимо учитывать следующие условия:

$$\begin{cases} F_{\delta\delta.}(N=) = F_{\delta\delta.}^0, \\ F_{\delta\delta.}(N \rightarrow \infty) = F_{\delta\delta.}^{\infty}, \\ F_{\delta\delta.} = F_{\delta\delta.}(N^2). \end{cases} \quad (2.76)$$

Для построения аналитического представления $F_{мп.}(N)$ предлагается зависимость:

$$F_{мп.}(N) = F_{мп.}^{\infty} - \frac{F_{мп.}^{\infty} - F_{мп.}^0}{\left((\mu + k_1) \frac{N^2 IE \cdot 4\pi}{\tilde{F}_0 L^2} + m \right)} \cdot m, \quad (2.77)$$

где параметр m характеризует угловой коэффициент касательной к графику $F_{мп.} = F_{мп.}(N)$ при $N = 0$.

Для определения $F_{mp.}^{\infty}$ в (2.77) можно использовать зависимость, полученную из следующих соображений: предельным по количеству витков будет случай, когда ось колонны образует пружину. Этому случаю соответствует удельное число витков $K^{kp.}$, определяемое по формуле:

$$K^{kp.} = [d_{mp.}]^1 = \frac{1}{d_{mp.}}, \quad (2.78)$$

откуда, с учетом (2.31):

$$\frac{1}{d_{mp.}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_{kp.}}{EI_{min}}}, \quad (2.79)$$

где $d_{mp.}$ – диаметр колонны труб.

С учетом (2.75) получаем:

$$F_{mp.}^{\infty} = (\mu + K_1) \cdot \frac{4\pi^2 EI_{min}}{d_{mp.}^2} \quad (2.81)$$

В знаменателе формулы (2.77) приведена безразмерная величина, зависящая от количества витков спирали. Множитель $\frac{1}{\tilde{F}_0}$ вводится для компенсации размерной величины $\frac{IE}{L^2}$, имеющую размерность силы, его количественная характеристика определяется посредством проведения расчетов на базе экспериментальных данных. Для проведения текстовых расчетов в качестве величины \tilde{F}_0 можно взять, например, значение критической нагрузки, необходимой для потери устойчивости колонны:

$$\tilde{F}_0 = \frac{\pi^2 EI_{min}}{l^2}, \quad (2.82)$$

после чего формула (2.77) принимает более компактный вид:

$$F_{mp.}(N) = F_{mp.}^{\infty} - \frac{F_{mp.}^{\infty} - F_{mp.}^0}{4(\mu + K_1)N^2 + m} \cdot m \quad (2.83)$$

Для проверки достоверности полученных результатов необходимо использовать имеющуюся информацию об характерных величинах действующих на объект сил и нагрузок.

Все приведенные результаты будут справедливы для движения колонны в прямолинейной скважине. В то же время, на основании известных экспериментальных данных можно предположить, что ось скважины имеет форму существенно трехмерной линии, причем изменение исправления проходки может иметь случайный характер.

Очевидно, что для исправленной оси скважины возникают дополнительные силы сопротивления при движении колонны труб в скважине. Важной характеристикой оси скважины при этом является радиус кривизны оси, которая в трехмерном пространстве задается уравнениями линии C :

$$\vec{r} = \vec{r}(t), \quad t_1 \leq t \leq t_2 \quad (2.84)$$

Выводы к разделу

1. Построена общая модель процесса деформирования колонны штанг в скважине с криволинейной осью, которая базируется на восстановлении пространственного положения ее оси с учетом спиралевидности. Вводятся функции, моделирующие трехмерные перемещения и деформации в

радиальном, тангенциальном и продольном направлениях, получены математические формулы для оценки компонентов тензора деформаций, а в рамках линейной теории упругости – для компонент тензора напряжений.

2. Установлена формула для оценки критической силы, под действием которой колонна приобретает спиралевидную конфигурацию, которая с достаточной для инженерных применений точностью (15-10%) согласуется с известными зависимостями, но имеет более простое математическое выражение с учетом особенности колонны штанг.

3. Построена модель процесса колебаний штанговой глубинно-насосной установки в процессе запуска и в установившемся режиме работы, учитывающая режим заполнения и сопротивления движению колонны. Для описания движения ее погружной части при $x=L$ используются уравнения типа уравнений Ван-дер-Поля.

4. Исследовано напряженно-деформированное состояние колонны насосно-компрессорных штанг в прямолинейной скважине при потере устойчивости и приобретении спиралевидной конфигурации оси. Оценены критические параметры геометрии колонны, после чего возможен ее обрыв только вследствие изменения геометрии.

5. Получены математические соотношения для оценки изменения длины колонны вследствие приобретения ею спиралевидной конфигурации, оценены характерные величины указанных параметров, установлено, что для оценки фактической длины колонны необходимо учитывать физические компоненты тензора напряжений, поскольку они определяют напряжение в единичном базисе и влияние особенностей геометрии колонны и системы координат, в которой проводятся расчеты, при этом отсутствует.

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО, АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШТАНГОВОЙ КОЛОННЫ

3.1. Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились на нефтепромыслах НГДУ «Надворнаянефтегаз» ОАО «Укрнефть», фонд которого составляет 155 ГНШУ, а средняя глубина спуска насосов – 1850 м. В основном используются насосы типа НСВ диаметром 32 мм и числом $n=6$.

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны скважины, эксплуатация которых характеризуется регулярным возникновением мгновенных отказов (обрывов) называемых работниками НГДУ «чертовыми скважинами». Как правило, это наклонные скважины.

Скважины выбирались таким образом, чтобы обеспечить различные комбинации глубины спуска насоса, длины хода, числа качаний и пространственной конфигурации, представленной совокупностью значений глубины скважины L , угла наклона φ и азимута θ ствола скважины, измеренных с дискретностью 5 ...25 м по глубине. Эксперименты проводили на трех нефтепромыслах НГДУ.

На Бытковском нефтепромысле были отобраны скважины: №№ 260, 308, 320, 463, насос типа НСВ1, диаметр насосов – 32 мм, длина хода соответственно – 3.0 м, 2.5 м, 3.0 м, 2.0 м и числом качаний – 5.0, 6.0, 6.5, 7.0. Глубина спуска насосов составляла – 1934 м, 2216 м, 1895 м и 2014 м.

На Довбушанском месторождении были выбраны скважины: №№ 66, 67, 72, 128, насос типа НСВ1, диаметр – 32 мм, длина хода составляла соответственно – 3.0 м, 3.0 м, 2.5 м, 3.0 м и число качаний – 6. Глубина

спуска составляла – 1760 м, 2183 м, 1896 м и 2090 м.

На Пневском нефтепромысле была отобрана всего одна скважина №812, которая эксплуатировалась насосом типа НВС1, диаметром – 32 мм, Длина хода составляла – 3.4 м, число качаний – 6, глубина спуска – 2103 м.

Проекции профиля скважины на координатные плоскости, а также пространственные конфигурации и радиус кривизны, отобранных для проведения экспериментальных исследований скважин, приведены в приложении А1.

Методика проведения экспериментальных исследований предусматривала снятие динамограмм с использованием системы диагностирования ГНШУ. Измерение нагрузки на полированный шток осуществлялось с помощью датчика накладного типа, а измерение перемещения проводили с использованием датчика угла поворота А178-А5, который с помощью магнитного узла крепления устанавливался на балансире станка-качалки непосредственно возле опоры.

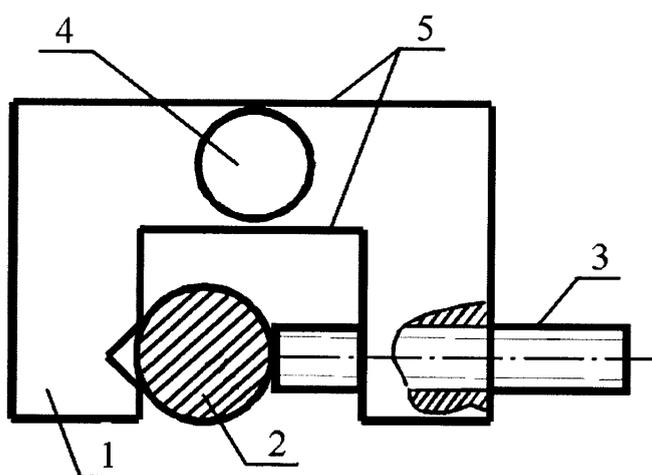


Рис. 3.1. Конструкция накладного датчика нагрузки

- 1 – чувствительный деформируемый элемент;
- 2 – полированный шток;
- 3 – прижимной винт;
- 4 – послабляющее отверстие;
- 5 – место расположения тензорезисторов.

Установка накладного динамометрического датчика перед началом измерений по сравнению с установкой вставного датчика в связи с отсутствием разгрузки колонны штанг имеет некоторые особенности. Для обеспечения линейности и однозначности работы датчика необходимо, чтобы уровень его начальной затяжки, которая осуществляется с помощью подпружиненного винта для каждой установки на полированный шток, был одинаков. Это означает, что код АЦП для двух различных установок должен быть одинаков. Добиться такого очень сложно, однако с приемлемой затратой времени, практически можно обеспечить затяжку винта с разбросом кода АЦП ± 50 ед., что для полной шкалы 20-разрядного АЦП (1048576 ед.) составляет $\approx 0,01\%$. При этом можно считать, что масштабные коэффициенты для трансформируемых нагрузок остаются одинаковыми.

Подробное описание разработанной системы диагностирования и ее технические характеристики рассмотрены в разделе 4.

3.2. Разработка программного обеспечения метода контроля технического состояния штанговой колонны, находящейся под действием силовых факторов

В главе 2 были разработаны математические модели процесса деформирования штанговой колонны и оценки сил сопротивления ее движению, учитывающих спиралевидность штанговой колонны и реальный профиль скважины, которые были положены в основу метода контроля технического состояния штанговой колонны, находящейся под действием силовых факторов.

Для реализации указанного метода, была разработана программа, позволяющая получить визуальное изображение деформированной штанги в трехмерном пространстве. Моделирование осуществлялось при помощи

пакета программных продуктов C++ Builder 6 [100]. Построение трехмерного изображения проводилось при помощи библиотеки OpenGL – Open Graphics Library, открытая графическая библиотека [101]. Библиотека OpenGL представляет собой интерфейс программирования трехмерной графики. Единицей информации являются вершины, из которых составляются более сложные объекты. Необходимо создать вершины, указать вид соединения (линиями или многогранниками), установить координаты и параметры камеры и ламп освещения, а библиотека OpenGL возьмет на себя всю работу по созданию изображения на экране. Это идеально подходит к решению поставленной задачи, поскольку разработчик не задумывается о деталях реализации алгоритмов трехмерной графики. Библиотека OpenGL непосредственно не поддерживает работу с устройствами ввода такими как мышка или клавиатура, поскольку эта библиотека является независимой платформой. Однако для преодоления этой проблемы можно задействовать функции конкретной операционной системы, под которую написано программу, или воспользоваться надстройками над OpenGL, такими как библиотеки GLUT или GLAUX.

Основное окно программы приведено на рис.3.2, а текст программы приведен в приложении А2. В левом нижнем углу находятся поля для ввода начальных параметров, необходимых для построения модели. При запуске программы эти поля уже установлены по умолчанию, поэтому для их изменения необходимо щелкнуть мышкой на соответствующем поле и ввести необходимое значение. Поле для ввода периода задает количество оборотов спирали. По умолчанию его значение равно 1. Поскольку изображение строится при помощи точек, то линия оси модели строится соответственно линиям между этими точками, а сама модель – цилиндрами. Для задания радиусов цилиндров используется поле «радиус цилиндра». В это поле можно вводить значения с плавающей запятой, хотя по умолчанию в поле стоит значение -1.

В левом верхнем окне основного окна программы находятся элементы построения изображения модели. Поставив или убрав галочку напротив элемента построения он, соответственно, будет отображаться или не отображаться. Графическая модель позволяет вычислить коэффициент удлинения штанги, который автоматически вычисляется для каждого новых начальных данных. Он расположен в верхнем правом углу главного окна. В нижней части окна размещены три кнопки «Вычислить», «Перестроить» и «Выход». Кнопка «Выход» предназначена для закрытия программы.

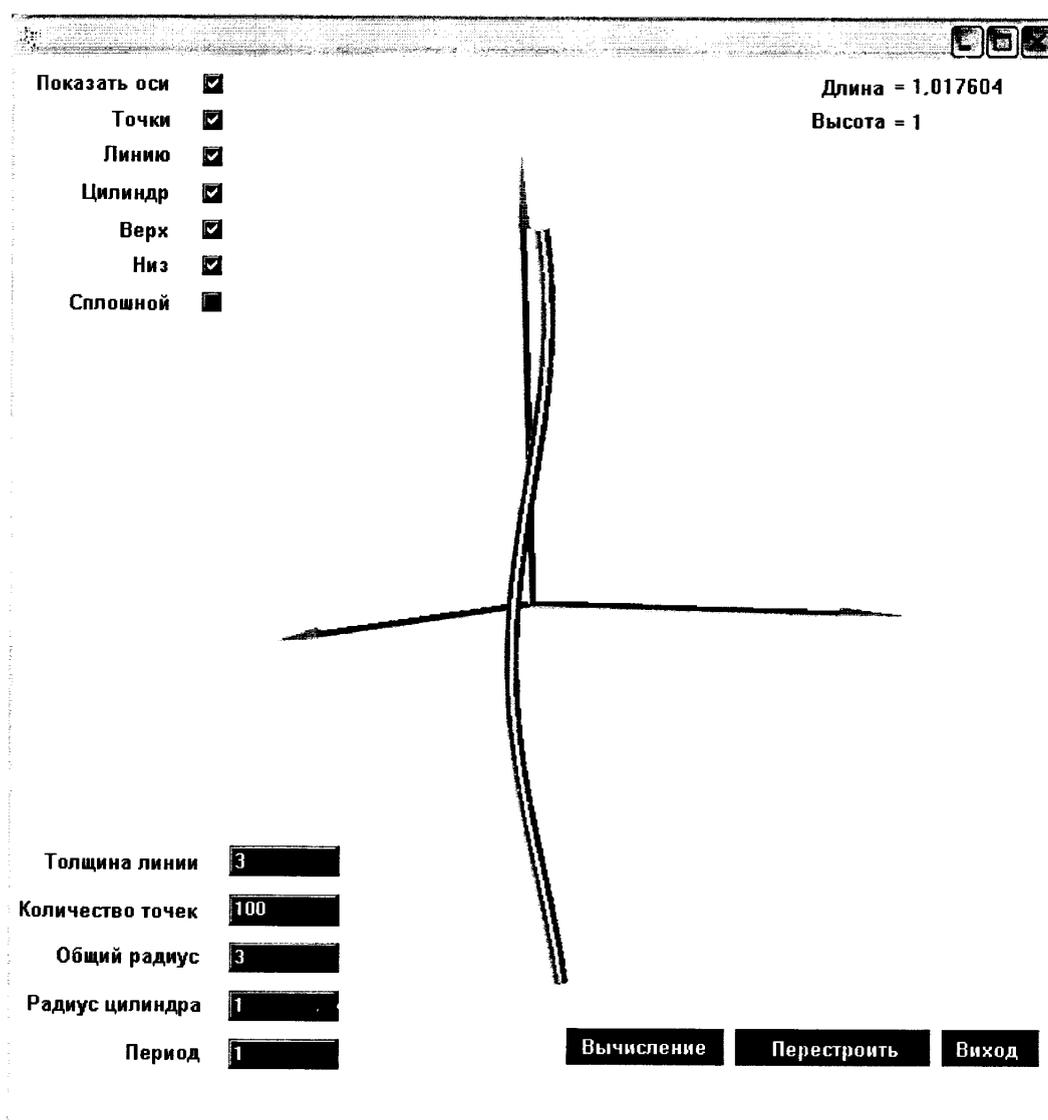


Рис. 3.2. Основное окно программы

Кнопка «Перестроить» возвращает в исходное положение модель после

того как она была сдвинута при помощи клавиш «Т», «В», «L» и «R» соответственно вверх, вниз, влево и вправо используя английскую раскладку клавиатуры, и при помощи клавиш-стрелок при вращении модели вокруг оси ординат и оси абсцисс. При помощи клавиш-цифр, которые расположены над клавишами литер, можно увеличивать и уменьшать графическую модель для лучшего ее просмотра. Увеличивая (уменьшая) графическую модель кнопкой «Перестроить» вернуть затем модель в исходное положение невозможно.

Это не предусмотрено поскольку увеличив изображения модели и для удобства повернув ее вокруг оси, кнопка «Перестроить» не уменьшает изображение до маленького размера, а только возвращает его в исходное положение. В дальнейшем нет необходимости повторно увеличивать или уменьшать модель.

Кнопка «Вычисление» открывает новое вспомогательное окно программы представленное на рис.3.3.

Начальные данные		Компоненты тензора напряжений	
Длина колонны штанг	3000	sigma_11 =	
Радиус НТК	0.031	sigma_12 =	
Радиус колонны штанг	0.0311	sigma_13 =	
Количество витков	10	sigma_22 =	
<input type="button" value="Вычислить..."/> <input type="button" value="Графики"/> <input type="button" value="Выход"/>		sigma_23 =	
		sigma_33 =	
Параметры Ламе материала		Компоненты тензора деформаций	
L =	M =	q_11 =	q_22 =
		q_12 =	q_23 =
		q_13 =	q_33 =
Первый инвариант тензора деформаций			
I =			

Рис. 3.3. Вспомогательное окно программы

В окне в разделе «Начальные данные» размещен перечень обязательных данных, которые необходимо ввести для вычисления напряжений. Ввод осуществляется в поле напротив названий. Некоторые значения введены автоматически по умолчанию. В этом же разделе

размещены три кнопки: «Вычислить», «График» и «Выход». Кнопка «Выход» закрывает окно «Вычисления» для просмотра графического изображения штанговой колонны по начальным данным, которые были введены предварительно. При помощи кнопки «Вычислить» осуществляются расчеты следующих параметров: параметров Ламе, первого инварианта тензора деформаций, компонента тензора деформаций, компонента тензора напряжений.

Кнопка «График» открывает окно для вывода графика зависимости максимального напряжения от количества витков штанговой колонны. На рис.3.4 представлено окно «Вычисления» для данных, поставленных по умолчанию.

Начальные данные		Компоненты тензора напряжений	
Длина колонны штанг	3000 2450 2000	sigma_11 = 0,025535708	
Радиус НТК	0.031	sigma_12 = 0	
Радиус колонны штанг	0.0311	sigma_13 = 0	
Количество витков	10	sigma_22 = 211,038899992	
<input type="button" value="Вычислить"/> <input type="button" value="Графики"/> <input type="button" value="Выход"/>		sigma_23 = 0,576853875	
		sigma_33 = 0,059620321	
Параметры Ламе материала		Компоненты тензора деформаций	
L = 121153858850,7734 M = 80769231210,1198		q_11 = 0	q_22 = 0
		q_12 = 0	q_23 = 3,571E-6
		q_13 = 0	q_33 = 2,11E-7
Первый инвариант тензора деформаций			
I = 2,10771E-9			

Рис. 3.4. Окно расчета компонентов тензора напряжений

В разделе «Исходные данные» напротив названия «Длина штанговой колонны» расположены три поля для ввода значения длины в метрах. В первом поле, которое по умолчанию имеет значение 3000, вводится значение длины штанговой колонны для расчета параметров, значения которых представлены в других разделах этого окна. В другие два поля вводятся также значения длины штанговой колонны. При этом результаты расчетов в

окне «Вычисление» не представляются, а отображаются для сравнения в виде графиков, представленных на рис.3.5.

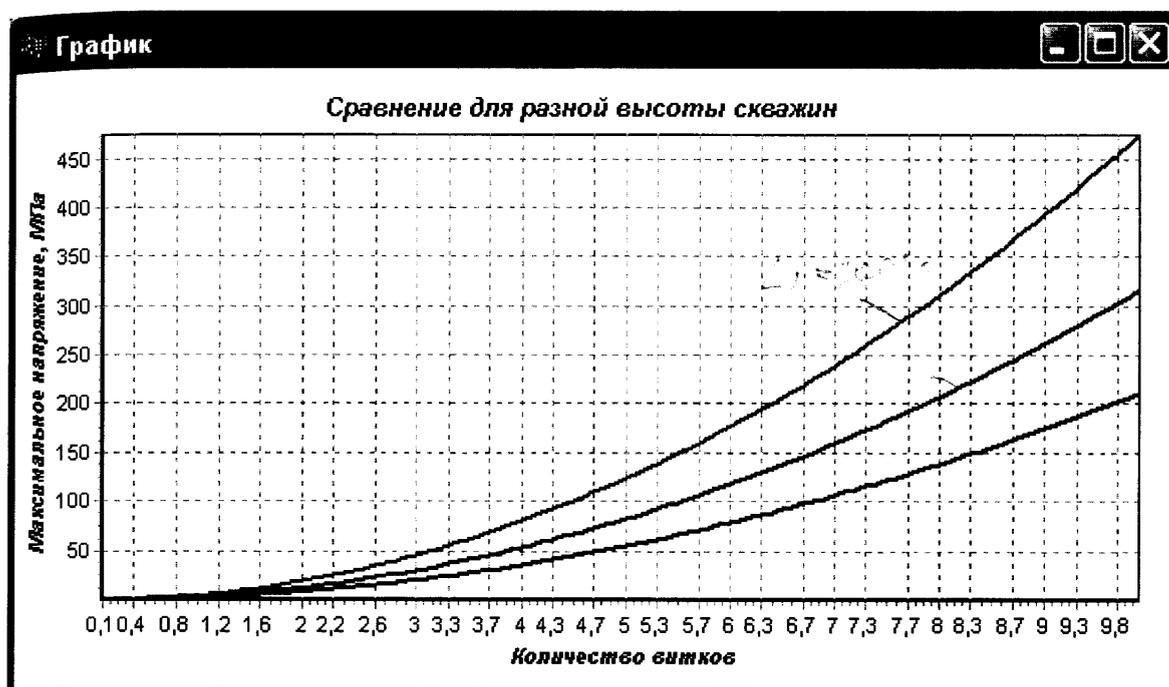


Рис. 3.5. Графики зависимости максимальных напряжений от количества витков штанговой колонны для скважины: 1 – $L=3000$ м, 2 – $L= 2450$ м, и 3 – $L= 2000$ м

3.3. Исследование влияния спиралевидности штанговой колонны ГНШУ на форму динамограммы

При наличии спиралевидного изгиба колонны штанг ГНШУ возникают дополнительные напряжения в колонне, величина которых зависит от количества витков спирали. Количество витков спирали зависит от величины действующей на колонну осевой нагрузки и момента кручения [54]:

$$N = \frac{KL}{2n}, \quad (3.1)$$

$$k = \frac{M}{2B} + \sqrt{\frac{0.66P}{B} + \frac{0.126M^2}{B^2} - \frac{0.205M}{B} \sqrt{\frac{0.363M^2}{B^2} + \frac{1.33P}{B}}}, \quad (3.2)$$

где $B = EI$ – жесткость поперечного сечения колонны;

параметр k определяет количество витков на единицу колонны – удельное количество витков спирали.

В условиях эксплуатации штанговой колонны осевая сжимающая нагрузка возникает вследствие наличия сил трения между колонной штанг и колонной НКТ в искривленных скважинах, трения между плунжером и цилиндром глубинного насоса, а также гидродинамического сопротивления жидкости при движении колонны штанг вниз в течение половины цикла качания. При движении штанг вверх во второй половине цикла качания на штанговую колонну действуют только растягивающие напряжения, обусловленные действием веса нефти внутри колонны НКТ и указанными выше силами трения. Кроме того, в динамических режимах работы, т.е. при большом числе качаний и глубине спуска насоса, колонна штанг подвергается периодической нагрузке от собственных колебаний. Также установлено [8], что в таком случае может возникать продольный изгиб колонны НКТ, что приводит к увеличению силы трения между колонной НКТ и колонной штанг. Момент кручения при работе ГНШУ является незначительным по сравнению с продольной осевой нагрузкой, за исключением скважин, при эксплуатации которых применяется штанговращатель.

Для скважин со значительной искривленностью спиралевидный изгиб колонны НКТ возможен уже при спуске их в скважину, так как при этом возникают значительные силы трения между нижним концом колонны НКТ и стенкой обсадной колонны на участках максимального изгиба последней. При дальнейшем спуске в процессе монтажа ГНШУ штанговой колонны внутрь колонны НКТ деформируется также и штанговая колонна по

аналогичной причине укладываясь в спираль внутри спиралевидно изогнутой колонны НКТ.

Таким образом, для оценки количества витков спирали необходимо прежде всего учитывать силы трения, которые в процессе монтажа и эксплуатации ГНШУ вносят основной вклад в продольную осевую сжимающую нагрузку. На рис.3.6 показана зависимость количества витков спирали от осевой нагрузки в предположении о равенстве нулю момента кручения для следующих значений параметров подземного оборудования ГНШУ:

- длина колонны штанг – 2000 м;
- средний диаметр штанг – 19 мм;
- средний диаметр НКТ – 89 мм.

Пределы изменения нагрузки выбраны исходя из того, что силы трения согласно экспериментальным исследованиям могут составлять до 16 % от максимальной нагрузки на колонну штанг [15, 26].

Следовательно, удельное количество витков спирали для широкого диапазона значений нагрузки составляет от 1 до 3. Дополнительные напряжения в колонне штанг, обусловленные ее спиралевидным изгибом, являются в таком случае пренебрежимо малыми (рис.3.7) по сравнению с погрешностью определения нагрузки на полированном штоке, составляющей для наиболее точных современных электронных динамографов не менее 500 Н.

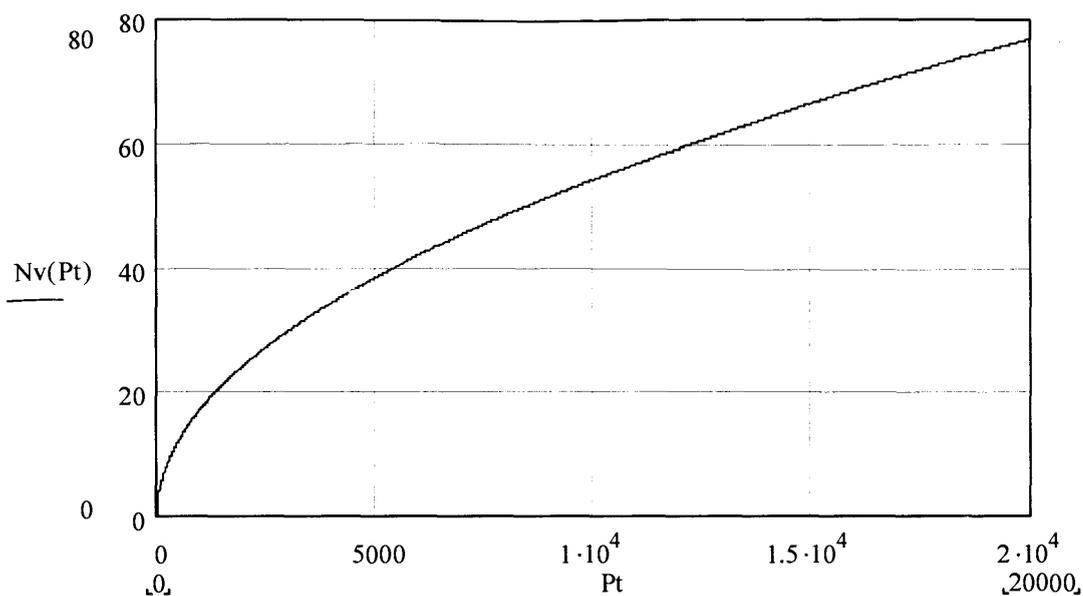


Рис. 3.6. Зависимость количества витков от продольной осевой нагрузки на колонну штанг

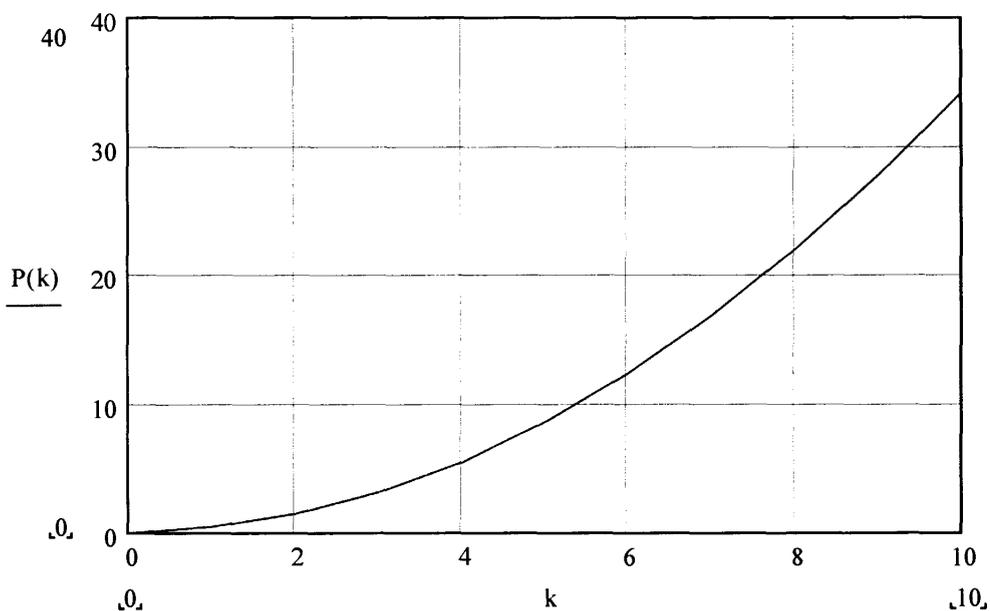


Рис. 3.7. Зависимость напряжения, обусловленного спиралевидным изгибом, от количества витков

При построении графика на рис.3.7 была использована формула [99] для определения компонента σ_{ss} тензора деформаций штанговой колонны.

Как было указано выше, при движении колонны штанг вверх продольная осевая нагрузка является растягивающей. Это может приводить к

«раскручиванию» спирали при ходе вверх с последующим восстановлением спиралевидности при ходе вниз под действием сжимающей нагрузки. При этом изменяется фактическая длина хода плунжера глубинного насоса на величину, соответствующую разности длины колонны штанг и длины спиралевидной линии, образованной вследствие деформации (рис.3.8):

$$\Delta L = L \left(\sqrt{1 + r^2 \cdot \left(\frac{2\pi N}{L} \right)^2} - 1 \right),$$

где L – длина колонны штанг;

r – средний радиус штанг;

N – количество витков спирали.

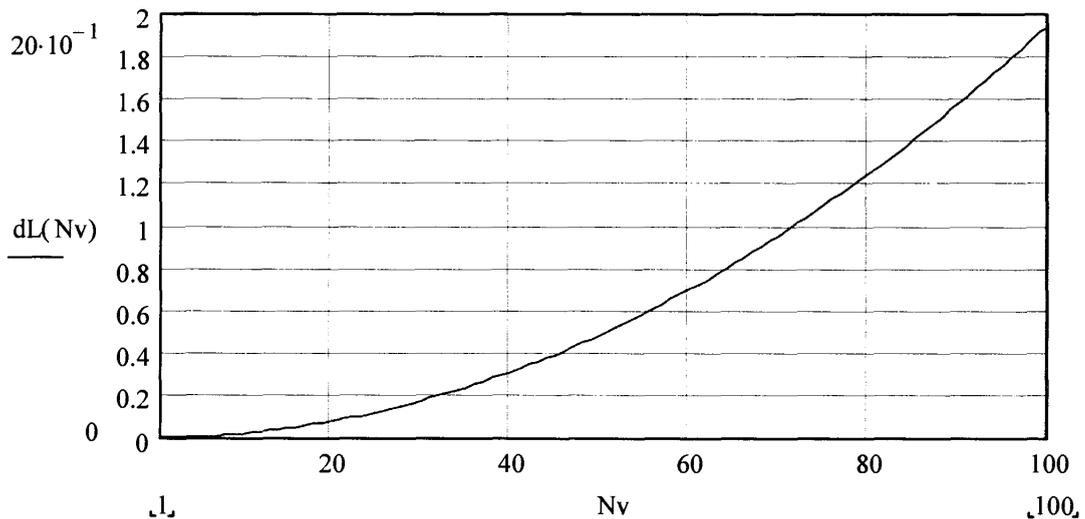


Рис. 3.8. Зависимость изменения длины хода плунжера от количества витков спирали

Для рассматриваемого диапазона количества витков изменение длины хода составляет величины порядка $10 \div 50$ см, что может быть выявлено по динамограмме глубинного насоса [102]. В связи с этим рассмотрим подробнее влияние спиралевидной деформации на форму динамограммы.

При приближении к верхней мертвой точке (т. С на рис.3.9) нагрузка на

полированный шток равна сумме нагрузки от веса жидкости внутри колонны НКТ и сил трения плунжер-цилиндр и штанги-трубы (вязкое трение, пропорциональное скорости движения колонны, при этом стремится к нулю). При этом колонна штанг находится в растянутом состоянии и величина деформации пропорциональна значению этой нагрузки. В верхней мертвой точке прекращается воздействие сил трения плунжер-цилиндр и штанги-трубы (участок $C - C_1$).

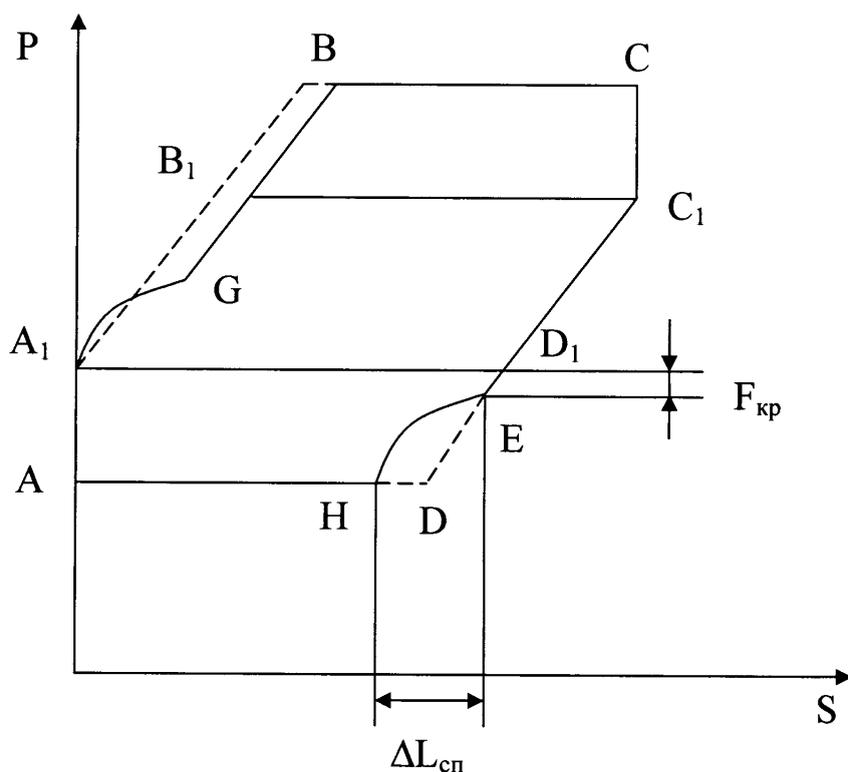


Рис. 3.9. Динамограмма нормальной работы ГНШУ

В начале хода штанговой колонны вниз прежде чем начнет двигаться плунжер глубинного насоса происходит снятие нагрузки с колонны штанг, сопровождающееся уменьшением деформации колонны. На динамограмме этот процесс отображается в виде участка прямой ($C_1 - D_1$) с угловым коэффициентом, пропорциональным коэффициенту жесткости штанговой колонны

$$k = \frac{E \cdot S_{шт}}{L},$$

где E – модуль Юнга материала штанг;

$S_{шт}$ – площадь поперечного сечения колонны;

L – длина колонны штанг.

После окончания процесса снятия нагрузки на колонну начинают действовать сжимающие усилия, обусловленные трением плунжер-цилиндр и штанги-трубы. До того момента, пока сжимающая нагрузка меньше критической $F_{кр}$, необходимой для начала процесса спиралевидного деформирования колонны штанг, происходит сжатие колонны, что соответствует участку $D_1 - E$ на динамограмме с тем же угловым коэффициентом, что и на предыдущем участке $C - D_1$.

Определим характер зависимости, описывающей следующий участок динамограммы $E-H$, соответствующий процессу спиралевидного деформирования колонны штанг. Как было определено ранее, под действием силы P (при условии, что момент кручения равен нулю) колонна штанг образует спиралевидную кривую с параметром

$$k = \sqrt{\frac{0.667P}{EI}}.$$

При этом изменение длины колонны в вертикальном направлении составляет

$$\Delta L = L \left(\sqrt{1 + r^2 \cdot \frac{0.667P}{EI}} - 1 \right),$$

где r – радиус колонны штанг.

Следовательно, участок Е-Н имеет вид параболы, обращенной выпуклостью вверх (рис.3.9).

В процессе восприятия нагрузки колонной штанг после прохождения нижней мертвой точки (т. А) вначале происходит "раскручивание" спирали по аналогичному закону (участок А – G), после чего колонна штанг растягивается пропорционально приложенной нагрузке.

Таким образом, при наличии спиралевидного деформирования штанговой колонны форма динамограммы должна несколько изменяться, причем изменение затрагивает один из наиболее информативных участков динамограммы – правый нижний (изменение его формы наблюдается, например, при дефектах всасывающего клапана, понижении динамического уровня и вредном влиянии газа). Это необходимо учитывать при формировании эталонов технических состояний ГНШУ, что может способствовать повышению достоверности диагностирования динамометрическим методом.

Рассмотрим характер влияния указанных факторов на динамограмму на примере скважины Б-320 Бытковского месторождения НГДУ "Надворнаянефтегаз". Эксплуатационные параметры ГНШУ для данной скважины следующие:

- глубина спуска насоса – 1895 м;
- диаметр насоса – 32 мм;
- количество качаний в минуту – 6,5;
- длина хода – 2 м;
- колонна штанг – комбинированная: 1200 м – диаметром 16 мм, 464 м – диаметром 21 мм, 231 м – диаметром 25 мм;
- колонна НКТ – диаметром 73 мм.

Динамический уровень на момент измерения экспериментальной динамограммы составлял около 875 м.

Кроме того, известны данные о пространственной конфигурации

скважины, представленные в виде совокупности значений глубины h , угла наклона φ и азимута θ ствола скважины, измеренных с дискретностью 5...25 м по глубине (как правило, 25 м, что соответствует длине одной буровой свечи). Для расчета величины сил трения, обусловленных искривленностью ствола скважины, необходимо определить радиус кривизны ствола по всей длине скважины. Для этого вначале определяются координаты (x, y, z) для каждой точки $i \in \overline{1, N}$, в которой проводились измерения:

$$\begin{aligned}\Delta z_i &= (h_i - h_{i-1}) \cdot \cos \varphi; \quad z_i = z_{i-1} + \Delta z_i; \\ \Delta x_i &= (h_i - h_{i-1}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta; \quad x_i = x_{i-1} + \Delta x_i; \\ \Delta y_i &= (h_i - h_{i-1}) \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta; \quad y_i = y_{i-1} + \Delta y_i.\end{aligned}$$

Далее для каждого участка определяется радиус кривизны. Простейший способ вычисления радиуса кривизны состоит в построении окружности, проходящей через три соседние точки измерений, и определение ее радиуса:

$$\begin{aligned}a_i &= \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}; \\ b_i &= \sqrt{(x_{i+1} - x_{i-1})^2 + (y_{i+1} - y_{i-1})^2 + (z_{i+1} - z_{i-1})^2}; \\ c_i &= \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}; \\ p_i &= \frac{a_i + b_i + c_i}{2}; \\ \alpha_i &= 2 \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{(p_i - b_i)(p_i - c_i)}{p_i(p_i - a_i)}} \right); \\ R_i &= \frac{a_i}{2 \cdot \sin \alpha_i}.\end{aligned}$$

Результаты расчетов для скважины Б-320 представлены на рис.3.10 и 3.11.

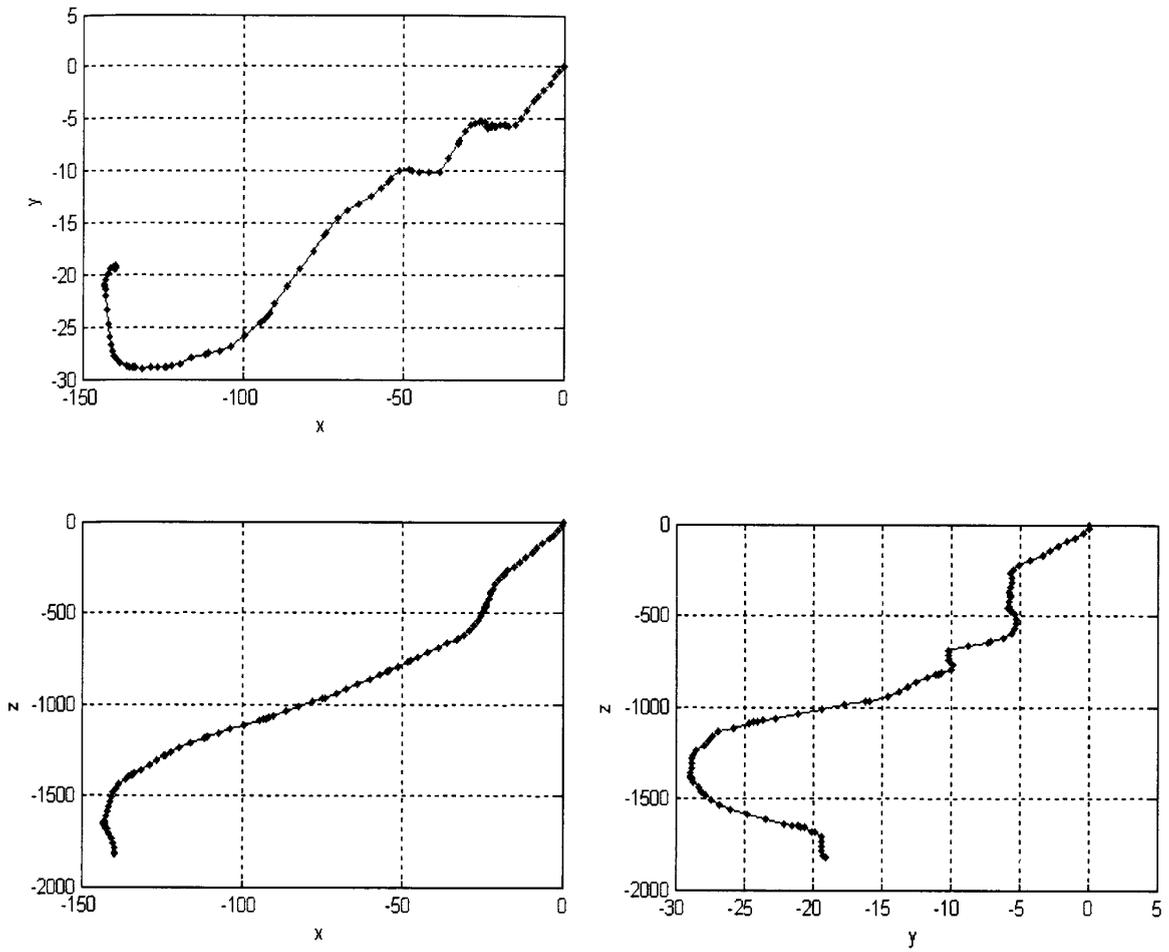


Рис. 3.10. Проекция профиля скважины на координатные плоскости

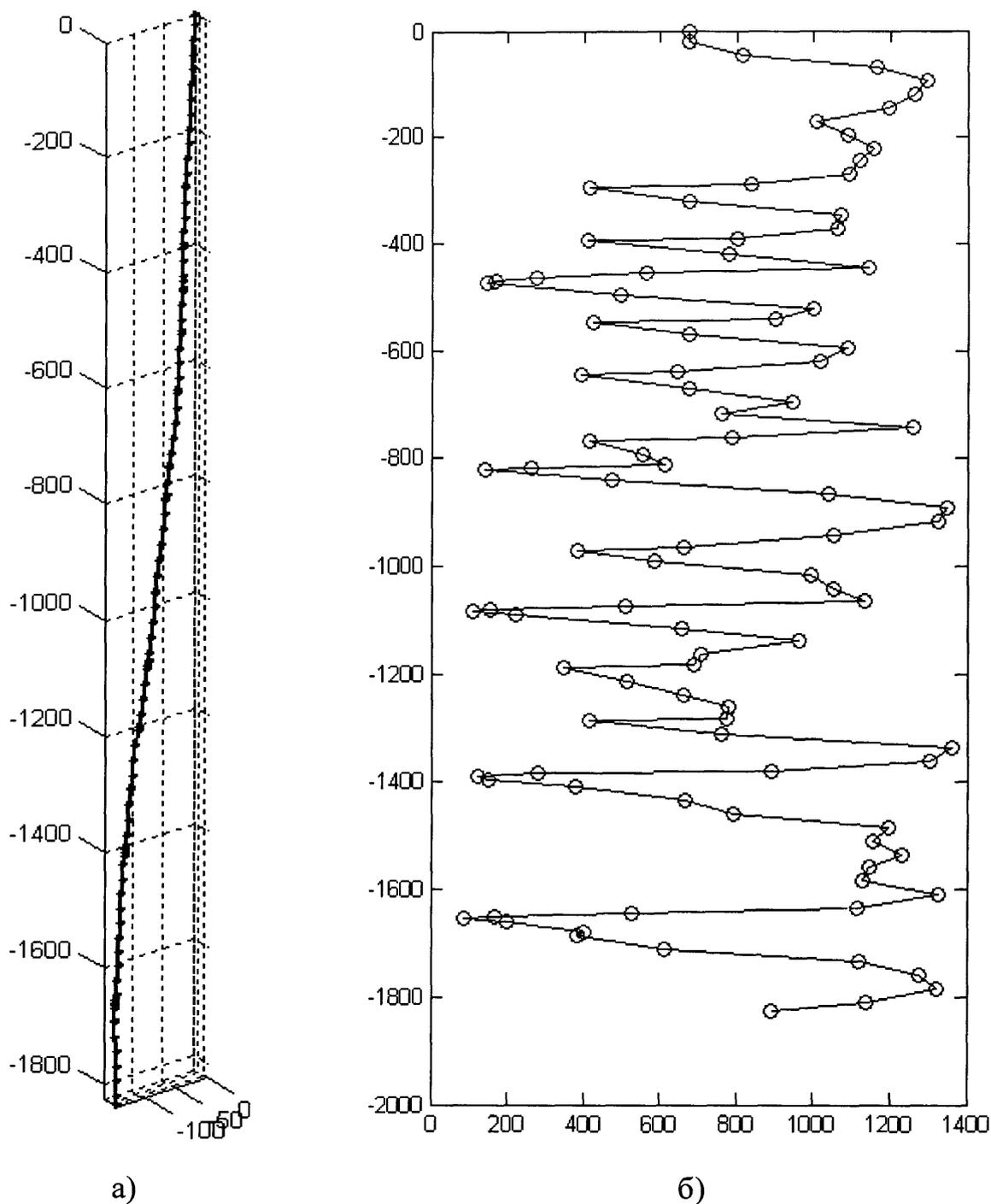


Рис. 3.11. Пространственная конфигурация (а) и радиус кривизны (б) скважины Б-320

Согласно [103, 104], критическая нагрузка на нижнем конце колонны, приводящая к изгибу, определяется как

$$F_{crit} = \sqrt[3]{EI(\pi M)^2},$$

где M – масса колонны штанг в жидкости.

Для скважины Б-320 критическая нагрузка составляет 73,35 Н, т.е. изгиб колонны будет иметь место, так как величина сил трения плунжер-цилиндр превышает указанное значение. Для предварительной ориентировочной оценки трения плунжер-цилиндр можно использовать формулу, приведенную в [1].

Рассчитаем эталонную динамограмму нормальной работы для скважины Б-320 без учета возможности спиралевидной деформации и сравним ее с динамограммой, полученной экспериментально. Для расчета используем формулы, приведенные в [105], основанные на известных формулах Вирновского [105, 96].

Как видно из рис.3.12, по сравнению с теоретической динамограммой, моменты начала хода вверх и вниз экспериментальной динамограммы несколько смещены, причем на экспериментальной динамограмме заметны участки по характеру близкие к параболической зависимости (обведены на рис.3.12). Смещение точки начала хода вверх составляет 0.152 м. Такое изменение длины колонны штанг вследствие спиралевидной деформации соответствует приложенной нагрузке 2400 Н. Смещение точки начала хода вверх составляет 0.23 м, что соответствует 4000 Н. Разность в нагрузке может объясняться, в частности, различными значениями величины вязкого (жидкостного) трения при ходе вверх и вниз. В [103] упоминается, что значения коэффициента вязкого трения составляют в среднем около 0.5 при ходе вверх и 0.15 при ходе вниз. Также различными будут значения скорости движения в эти моменты времени. Вычислив значения жидкостной составляющей трения как $F_{тр.ж} = 2\beta \cdot M \cdot v$, где β – коэффициент вязкого трения; M – масса колонны штанг в жидкости; v – скорость движения в соответствующий момент времени, получим значения 1910 Н для начала хода вверх и 3664 Н для начала хода вниз.

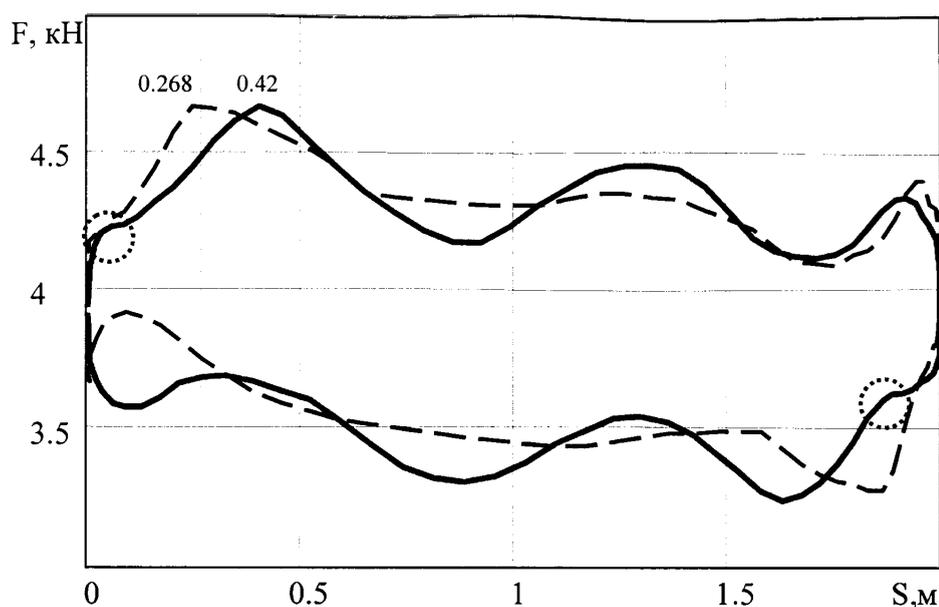


Рис. 3.12. Теоретическая (_ _ _) и экспериментальная (____) динамограммы нормальной работы для скважины Б-320

Остальная часть нагрузки обусловлена трением плунжер-цилиндр и штанги-трубы.

Применение упрощенных эталонов, не учитывающих возможности спиралевидного деформирования, согласно методике диагностирования, приведенной в [106], приводит к неправильному результату диагностирования (табл.3.1) для приведенной выше динамограммы. Для формирования вектора диагностических признаков было выбрано три способа:

- дискретизированная по времени кривая нагрузки на полированный шток ГНШУ;
- действительные и мнимые составляющие комплексных коэффициентов преобразования Фурье кривой нагрузки – традиционный диагностический признак при диагностировании ГНШУ [65];
- коэффициенты вейвлет-преобразования кривой нагрузки – признак, согласно [106], обеспечивающий максимальную достоверность диагностирования.

Количество коэффициентов обоих преобразований было выбрано равным 32. В качестве меры близости вычислялись расстояние Хэмминга между векторами диагностических признаков эталон^{сз} различных технических состояний ГНШУ и исследуемой динамограммы, а также величина $(1 - R_{xy})$, где R_{xy} - коэффициент корреляции между данными векторами.

Таблица 3.1

Результаты расчета мер подобия с упрощенными эталонами

Тип эталона	Диагностический признак и мера близости					
	кривая нагрузка- время		коэффициенты преобразования Фурье		коэффициенты вейвлет- преобразования	
	расстояние Хэмминга	1 - R_{xy}	расстояние Хэмминга	1 - R_{xy}	расстояние Хэмминга	1 - R_{xy}
Нормальная работа	0.101	0.079	0.000	0.088	0.173	0.081
Влияние газа	0.373	0.302	0.018	0.326	0.412	0.305
	0.259	0.211	0.005	0.228	0.328	0.213
	0.183	0.156	0.002	0.170	0.325	0.158
Низкий динамический уровень	0.468	0.404	0.029	0.436	0.448	0.407
	0.364	0.312	0.015	0.336	0.335	0.314
	0.258	0.233	0.009	0.251	0.388	0.235
Утечка в нагнетательной части	0.152	0.123	0.025	0.129	0.254	0.125
	0.073	0.077	0.011	0.083	0.146	0.077
	0.052	0.036	0.005	0.042	0.086	0.035
Утечка в приемной части	0.153	0.105	0.019	0.107	0.213	0.103
	0.080	0.059	0.007	0.068	0.067	0.061
	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Прихват плунжера	0.734	0.769	0.027	0.801	0.723	0.772
Низкая посадка плунжера	0.120	0.088	0.001	0.098	0.175	0.090
Среднее значение меры близости	0.225	0.197	0.012	0.211	0.271	0.198

В таблице для упрощения анализа в каждом столбце приведены

значения разности между вычисленным значением и минимальным для данного столбца. Для дефектов, характеризующихся незаполнением глубинного насоса (утечки в нагнетательной и приемной части, влияние газа, низкий динамический уровень) использовалось по три эталона с разными коэффициентами заполнения насоса (0.3, 0.5 и 0.7).

В данном случае для большинства способов формирования вектора диагностических признаков и вычисления мер близости был получен диагноз "Утечка в приемной части" (минимальное значение меры близости), хотя исследуемая динамограмма характеризует состояние нормальной работы ГНШУ. Исключение составляет комбинация "коэффициенты преобразования Фурье – расстояние Хэмминга", однако среднее значение разности меры близости между "правильным" эталоном и остальными эталонами является очень малым (см. последнюю строку табл.3.1), т.е. расстояние между вектором диагностических признаков исследуемой динамограммы и векторами признаков всех эталонов примерно одинаково, что свидетельствует о плохой разрешающей способности данного метода. Лучший способ получения вектора диагностических признаков в данном случае – применение вейвлет-преобразования к кривой нагрузки на полированный шток, однако неправильный диагноз получается и в данном случае – вследствие несовершенства метода формирования эталонов. Следовательно, необходимо усовершенствовать алгоритм построения эталонов технических состояний ГНШУ с учетом возможной спиралевидной деформации штанговой колонны.

3.4. Усовершенствование алгоритма диагностирования ГНШУ по динамограмме с учетом спиралевидной деформации штанговой колонны

Для формирования эталона, учитывающего эффект спиралевидного

изгиба, кроме параметров, на основе которых рассчитывается упрощенная параллелограммная динамограмма, необходимы следующие исходные данные:

- значение критической нагрузки, при которой происходит спиралевидная деформация колонны штанг – рассчитывается согласно (2.82);
- суммарная величина сил трения, с учетом которой рассчитывается величина деформации штанговой колонны – рассчитывается согласно (2.85 – 2.90).

Эталон нормальной работы ГНШУ формируется следующим образом (см. рис.3.9). Пусть S_{max} – длина хода полированного штока, T – период качаний станка-качалки ГНШУ, H – динамический уровень жидкости в затрубном пространстве скважины, $\rho_{ш}$ – плотность материала штанг, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, E – модуль Юнга материала штанг, $f_{пл}$ – площадь поперечного сечения плунжера глубинного насоса, $f_{шi}$, $l_{шi}$ – соответственно площади поперечного сечения и длины участков штанговой колонны с различными диаметрами штанг ($r_{шi} = 16$ мм для $i=1$, 19 мм для $i=2$, 22 мм для $i=3$ и 25 мм для $i=4$), f_{Ti} , l_{Ti} – соответственно площади поперечного сечения и длины участков колонны НКТ с различными диаметрами труб ($r_{Ti} = 60$ мм для $i=1$, 73 мм для $i=2$, 89 мм для $i=3$ и 102 мм для $i=4$), P_{TP} – суммарная величина сил трения.

Обозначим $\lambda_{ж}$ суммарное удлинение колонны штанг и НКТ под действием веса столба жидкости внутри колонны НКТ:

$$\lambda_{ж} = \frac{P_{ж}}{E} \cdot \sum_{i=1}^4 \left(\frac{l_{шi}}{f_{шi}} + \frac{l_{Ti}}{f_{Ti}} \right),$$

λ_{TP} – удлинение колонны штанг под действием сил трения:

$$\lambda_{TP} = \frac{P_{TP}}{E} \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{l_{шi}}{f_{шi}}$$

и λ_{FKP} – удлинение колонны штанг под действием силы, величина которой равна критическому значению, необходимому для начала процесса спиралевидной деформации:

$$\lambda_{FKP} = \frac{F_{KP}}{E} \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{l_{\text{Ш}i}}{f_{\text{Ш}i}}.$$

Участок С – Е (снятие нагрузки с колонны штанг) описывается линейной зависимостью

$$P(S) = P_{\text{Ш}} + P_{\text{Ж}} - k \cdot (S_{\text{max}} - S) \text{ при } S_{\text{max}} - \lambda_{\text{Ж}} - \lambda_{FKK} < S < S_{\text{max}}.$$

Тут $P_{\text{Ш}} = (\rho_{\text{Ш}} - \rho_{\text{Ж}}) \cdot g \cdot \sum_{i=1}^4 f_i \cdot l_i$ – вес штанг в жидкости,

$P_{\text{Ж}} = f_{\text{nl}} \cdot H \cdot \rho_{\text{Ж}} \cdot g$ – вес жидкости в колонне НКТ, а угловой коэффициент k определяется как

$$k = \frac{P_{\text{Ж}} + P_{TP}}{\lambda_{\text{Ж}} + \lambda_{TP}}.$$

Участок Е – Н описывается зависимостью

$$P(S) = \frac{EI}{0.667} \cdot \sum_{i=1}^4 \left(\frac{1}{r_{\text{Ш}i}} \cdot \left[\left(\frac{S_{\text{max}} - \lambda_{\text{Ж}} - \lambda_{FKK} - S}{l_{\text{Ш}i}} + 1 \right)^2 - 1 \right] \right)$$

при $S_{\text{max}} - \Delta L_{\text{СП}} < S < S_{\text{max}} - \lambda_{\text{Ж}} - \lambda_{FKK}$,

где $\Delta L_{\text{СП}} = \sum_{i=1}^4 l_{\text{Ш}i} \cdot \left(\sqrt{1 + r_{\text{Ш}i}^2 \cdot \frac{0.667 P_{TP}}{EI}} - 1 \right)$ – изменение длины колонны штанг

вследствие спиралевидной деформации.

Следующий участок Н – А – это прямая

$$P(S) = P_{Ш} - P_{ТР} \text{ при } 0 < S < S_{max} - \Delta L_{СП}.$$

Участок А₁ – Г аналогичен по конфигурации участку Е – Н и описывается зависимостью

$$P(S) = P_{Ш} + P_{ТР} + \frac{EI}{0.667} \cdot \sum_{i=1}^4 \left(\frac{1}{r_{Шi}} \cdot \left[\left(\frac{S}{l_{Шi}} + 1 \right)^2 - 1 \right] \right) \text{ при } 0 < S < \Delta L_{СП}.$$

Участок Г – В – прямая восприятия нагрузки колонной штанг с угловым коэффициентом k :

$$P(S) = P(\Delta L_{СП}) + k \cdot (S - \Delta L_{СП}) \text{ при } \Delta L_{СП} < S < \lambda_{Ж} + \lambda_{ТР}.$$

Наконец, участок В – С – это прямая

$$P(S) = P_{Ш} + P_{Ж} + P_{ТР} \text{ при } \lambda_{Ж} + \lambda_{ТР} < S < S_{max}.$$

При необходимости формирования эталона в виде зависимости $P(t)$ (нагрузка-время) в вышеприведенные формулы подставляются значения перемещения $S(t)$ в соответствующие моменты времени, а пределы изменения аргумента t принимаются следующими:

- для участка С₁ – Е:

$$\frac{T}{2} < t < T - \frac{T}{2\pi} \cdot \arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{S_{max} - \lambda_{Ж} + \lambda_{FKK}}{S_{max}}\right);$$

- для участка Е – Н:

$$T - \frac{T}{2\pi} \cdot \arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{S_{max} - \lambda_{Ж} + \lambda_{FKK}}{S_{max}}\right) < t < T - \frac{T}{2\pi} \cdot \arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{S_{max} - \Delta L_{СП}}{S_{max}}\right);$$

- для участка Н – А:

$$T - \frac{T}{2\pi} \cdot \arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{S_{max} - \Delta L_{СП}}{S_{max}}\right) < t < T;$$

- для участка А₁ – G:

$$0 < t < \frac{T}{2\pi} \cdot \arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{\Delta L_{СП}}{S_{max}}\right);$$

- для участка G – B:

$$\frac{T}{2\pi} \cdot \arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{\Delta L_{СП}}{S_{max}}\right) < t < \frac{T}{2\pi} \cdot \arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{\lambda_{Ж} + \lambda_{ТР}}{S_{max}}\right);$$

- для участка B – C:

$$\frac{T}{2\pi} \cdot \arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{\lambda_{Ж} + \lambda_{ТР}}{S_{max}}\right) < t < \frac{T}{2}.$$

Эталоны всех остальных технических состояний могут быть получены

из эталона нормальной работы по известным алгоритмам [50, 107]. Исключением являются эталонные динамограммы для состояний «заедание плунжера при ходе вниз» и «прихват плунжера», характеризующиеся достаточно длительными интервалами приложения к штангам сжимающей нагрузки, превышающей критическую нагрузку, вызывающую спиралевидную деформацию. Например, на рис.3.13 видно, что участки А – В и С – D носят параболический характер, что обусловлено спиралевидным деформированием колонны штанг.

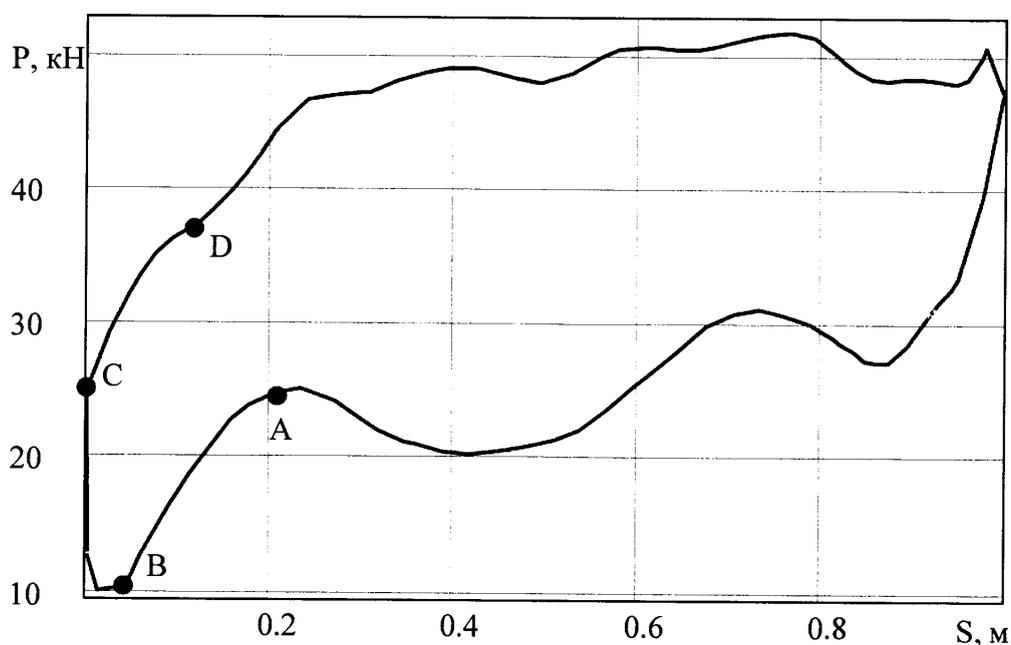


Рис. 3.13. Динамограмма при наличии дефекта «Заедание плунжера при ходе вниз»

Участок на эталонной динамограмме, соответствующий участку А – В на рис.3.13, следует формировать согласно зависимости

$$P(S) = \frac{EI}{0.667} \cdot \sum_{i=1}^4 \left(\frac{1}{r_{\text{ш}i}} \cdot \left[\left(\frac{S_{np} - S}{l_{\text{ш}i}} + 1 \right)^2 - 1 \right] \right) \text{ при } 0 < S < S_{np},$$

где S_{np} – расстояние от нижней мертвой точки до места заедания.

Участок на эталонной динамограмме, соответствующий участку С – D, формируется аналогично, но с добавлением суммарной величины сил трения

F_{mp} :

$$P(S) = \frac{EI}{0.667} \cdot \sum_{i=1}^4 \left(\frac{1}{r_{\text{ш}i}} \cdot \left[\left(\frac{S_{np} - S}{l_{\text{ш}i}} + 1 \right)^2 - 1 \right] \right) + F_{mp}.$$

В случае прихвата плунжера S_{np} принимается равным длине хода полированного штока.

3.5. Апробация алгоритма диагностирования, ГНШУ учитывающего спиралевидную деформацию штанговой колонны, на экспериментальных данных

В соответствии с описанным выше алгоритмом были сформированы эталоны технических состояний ГНШУ для скважины Б-320. Эталон нормальной работы показан на рис.3.14.

В данном случае при формировании эталона учитывается только инерционный поворот динамограммы и не учитываются собственные колебания штанговой колонны, так как расчет наземной динамограммы из плунжерной, основанный на математической модели, в которой не учитывается спиралевидная деформация, дает не вполне правильные результаты для нижней части динамограммы (см. рис.3.12).

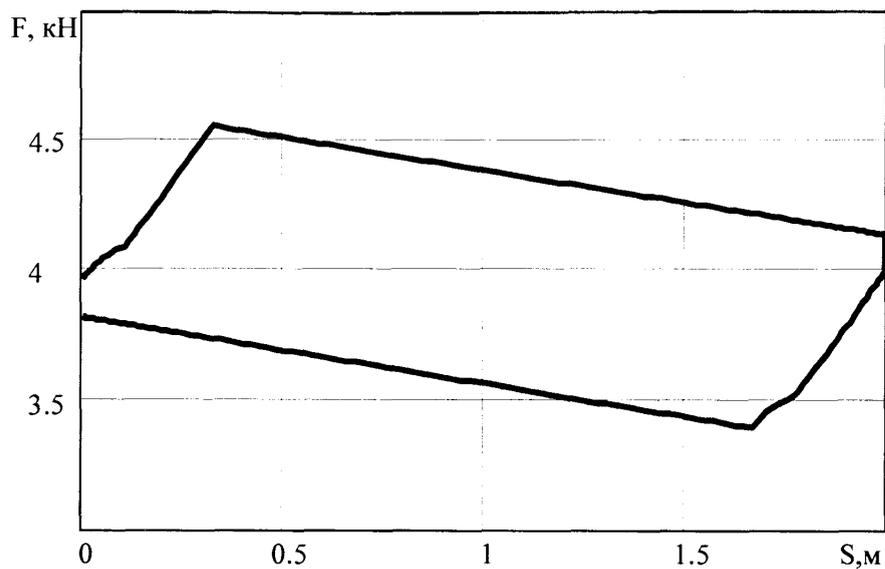


Рис. 3.14. Уточненная эталонная динамограмма нормальной работы для скважины Б-320

Результаты расчета мер близости исследуемой динамограммы с эталонами, образованными на основе уточненного эталона нормальной работы, приведены в табл.3.2.

Результаты расчета мер подобия с уточненными эталонами

Тип эталона	Диагностический признак и мера близости					
	кривая нагрузка- время		коэффициенты преобразования Фурье		коэффициенты вейвлет- преобразования	
	расстояние Хэмминга	$1 - R_{xy}$	расстояние Хэмминга	$1 - R_{xy}$	расстояние Хэмминга	$1 - R_{xy}$
Нормальная работа	0.018	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000
Влияние газа	0.251	0.136	0.025	0.140	0.200	0.135
	0.155	0.079	0.012	0.080	0.144	0.078
	0.076	0.045	0.007	0.046	0.132	0.045
Низкий динамический уровень	0.363	0.241	0.037	0.253	0.297	0.239
	0.275	0.168	0.027	0.175	0.176	0.167
	0.160	0.105	0.015	0.108	0.211	0.103
Утечка в нагнетательной части	0.146	0.067	0.012	0.066	0.351	0.065
	0.078	0.038	0.009	0.039	0.232	0.037
	0.037	0.020	0.010	0.021	0.100	0.016
Утечка в приемной части	0.126	0.054	0.012	0.056	0.305	0.053
	0.047	0.024	0.005	0.025	0.146	0.023
	0.000	0.005	0.000	0.003	0.017	0.002
Прихват плунжера	0.919	0.906	0.048	0.941	1.104	0.908
Низкая посадка плунжера	0.066	0.024	0.010	0.019	0.099	0.023
Среднее значение меры близости	0.181	0.127	0.016	0.131	0.234	0.126

В данном случае при использовании в качестве меры близости коэффициента корреляции для всех способов формирования вектора диагностических признаков был получен правильный результат диагностирования – "Нормальная работа". При этом наилучшую разрешающую способность обеспечивает формирование вектора диагностических признаков на основе вейвлет-преобразования сигнала нагрузки на полированный шток.

Аналогичные расчеты были произведены для ряда скважин Бытковского, Довбушанского и Пасичнянского месторождений НГВУ «Надворнаянефтегаз». В приложении В1 приведены результаты расчета профиля и радиуса кривизны для некоторых из исследованных скважин. Результаты диагностирования без применения и с применением предложенной методики для данных скважин приведены в табл.3.3.

Таблица 3.3

Результаты диагностирования

Скважина	Критическая нагрузка, Н	Суммарная величина сил трения, Н	Диагноз без учета спиралевидности	Диагноз с учетом спиралевидности
Б-708	87,4	5890	Откачка жидкости с газом	Заедание плунжера при ходе вниз
П-812	72,3	2305	Утечка в приемной части	Утечка в приемной части
Д-66	92,6	3710	Нормальная работа	Нормальная работа
Д-67	148,9	3415	Утечка в приемной части	Нормальная работа

Таким образом, предложенное усовершенствование алгоритма является эффективным в том случае, когда величина сил трения является достаточно большой, то есть в первую очередь для скважин, сильно искривленных, или (и) с высоковязкой откачиваемой жидкостью. В остальных случаях вероятность получения неправильного диагноза без учета спиралевидности колонны штанг близка к нулю, так как отличия между эталонными динамограммами, рассчитанными с учетом и без учета данного эффекта,

являются пренебрежимо малыми.

Выводы к разделу

1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая для скважин с различными комбинациями технологических параметров и пространственного положения ствола скважины получить данные, необходимые для проверки разработанных методов.

2. Установлено, что вследствие спиралевидной деформации штанговой колонны фактическая длина хода плунжера изменяется на $10 \div 50\delta$, что может быть выявлено по динамограмме глубинного насоса.

3. Определен характер изменения формы динамограммы вследствие спиралевидной деформации штанговой колонны.

4. Предложено аналитическое представление эталонной динамограммы нормальной работы, учитывающее эффект спиралевидности.

5. Предложен усовершенствованный алгоритм диагностирования ГНШУ по динамограмме на основании расчета меры подобия между экспериментальной динамограммой и эталонными динамограммами различных технических состояний, полученными из эталонной динамограммы нормальной работы, учитывающей эффект спиралевидности.

6. Проведена апробация усовершенствованного алгоритма диагностирования на экспериментальных данных, полученных со скважин НГДУ «Надворнаянефтегаз». Результаты апробации свидетельствуют о повышении достоверности диагностирования вследствие учета спиралевидности для искривленных скважин.

РАЗДЕЛ 4

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГНШУ

4.1. Разработка функциональной схемы системы диагностирования ГНШУ

Техническая реализация электронной динамометрической системы предусматривает создание средств измерения и средств их метрологической аттестации. Технические средства измерения должны включать датчики нагрузки, датчики перемещения и средства преобразования и обработки измерительных сигналов с возможностью их накопления. Датчики нагрузки, которые могут быть использованы в динамометрических системах диагностирования ГНШУ, должны обеспечивать приемлемую погрешность измерений в условиях неравномерности и неравномерной направленности вектора нагрузки, действия неблагоприятных погодных-климатических условий эксплуатации. Кроме того, такой датчик должен быть удобным в эксплуатации, которая предопределяет дополнительные требования, налагающие ограничение на его массу и объем. Датчик перемещения должен обеспечивать высокую точность измерений, поскольку данные, полученные при помощи этого датчика, также как и от датчика нагрузки, влияют на форму полученной динамограммы, а, следовательно, и на точность постановки диагноза. Такие рассуждения исключают из рассмотрения датчики перемещения, построенные по принципу косвенных измерений (на основе акселерометра с последующей двойной интеграцией сигнала ускорения), поскольку они имеют погрешность $\sigma > 5\%$. Средства преобразования и обработки измерительных сигналов могут быть выполнены на распространенных микроконтроллерах, поскольку на

современном этапе развития микроэлектронной техники они имеют параметры, соответствующие выдвинутым для решения поставленной задачи, требованиям.

Блок-схема системы диагностирования ГНШУ приведена на рис.4.1.

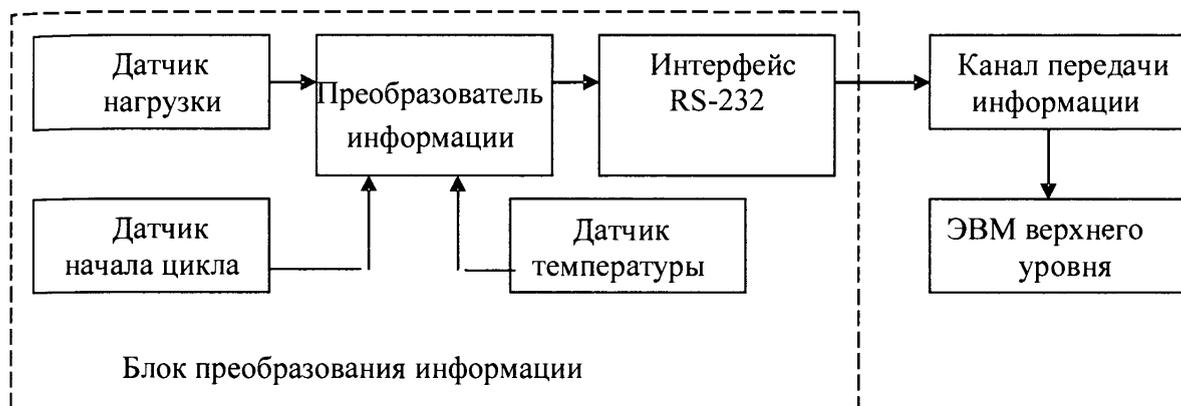


Рис. 4.1. Блок-схема системы диагностирования ГНШУ

Динамограммы, полученные в процессе измерений, сохраняются и обрабатываются непосредственно в ЭВМ верхнего уровня. При этом предыдущая обработка данных включает у себя преобразование аналоговых сигналов в цифровой, отслеживание начала рабочего цикла СК и передачу необходимого объема данных в течение времени, кратного заданному количеству циклов СК. Последующая обработка, в отличие от предыдущей, осуществляется ЭВМ верхнего уровня и включает в себя алгоритмы распознавания образов и автоматического диагностирования [108].

Разработка электронной части диагностированной системы включает в себя разработку узлов, позволяющих использовать измерительные преобразователи тензометрического типа. Исходя из этого, можно сформулировать основные требования к такой схеме:

- разрядность АЦП $n \geq 16$;

- частота дискретизации $f_d \geq 10$ Гц;
- возможность использования последовательных интерфейсов типа RS-232C, совместимых из ЭВМ типа IBM PC;
- питание устройства должно осуществляться от постоянного напряжения +12В, поскольку это вызвано необходимостью автономного питания.

Учитывая то обстоятельство, что накладные на полированный шток динамографы очень чувствительны к корпусным осевым нагрузкам, использование в них механических датчиков перемещения рулеточного типа является крайне затруднительным. Использование же датчиков перемещения акселерометрического типа при малых скоростях движения полированного штока приводит к недопустимым погрешностям измерения перемещения, что приводит к искажению формы динамограмм. Поэтому форма кривой функции перемещения полированного штока может быть записана в память ЭВМ а синхронизация постановки значений осуществляется в крайнем нижнем положении полированного штока с помощью магнитоуправляемого электрического контакта.

4.2. Разработка электронной части первичного преобразователя системы диагностирования ГНШУ

С учетом выдвинутых требований было разработано устройство обработки измерительной информации, блок-схема которого приведена на рис.4.2.

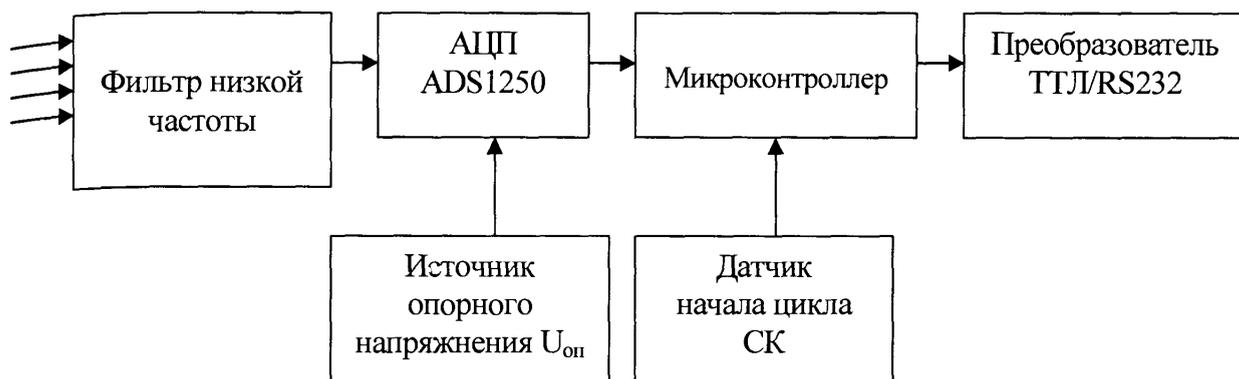


Рис. 4.2. Блок-схема устройства обработки измерительной информации

В соответствии с рис.4.2 осуществлен выбор необходимых элементов схемы. Фильтр низкой частоты предназначен для устранения высокочастотных помех, которые наводятся на внешних проводниках схемы. В качестве АЦП использована микросхема ADS1250 – 20-разрядный дельта-сигма АЦП с однополярным питанием +5 В. Микросхема имеет дифференциальный вход, необходимый для подсоединения мостовых схем, возможность изменения коэффициента усиления ($K_{\text{П}} = 1,2,4,8$) и не требует программирования параметров работы, что упрощает ее использование. Интегральная нелинейность не превышает $\pm 0,002$ %. Более детальные технические характеристики приведены в [109].

Как источник опорного напряжения использована микросхема AD780, предназначенная для использования в 16-разрядных аналого-цифровых системах. AD780 формирует высокостабильное опорное напряжение $U_{\text{ОП}} = 3$ В. Детальные технические характеристики приведены в [110].

В качестве микроконтроллера для первичного преобразователя использовано AT90S8535. Работа микроконтроллера осуществляется с помощью управляющей программы, написанной на языке Си. Алгоритм этой программы обеспечивает превращение промежуточного последовательного

кода АЦП в последовательный код формата RS232C, совместимого с ЭВМ типа IBM PC. Синхронизация данных в ЭВМ начинается после отслеживания начала рабочего цикла СК по соответствующему сигналу магнитоуправляемого переключателя. Основные технические характеристики АТ90S8535 приведены в [111].

Для преобразования уровней сигнала TTL/RS232C, использована микросхема SP232 – полный аналог микросхемы MAX232A, которая обеспечивает преобразование уровней 0...+5 В/±12 В, без дополнительных напряжений питания кроме +5 В, используя для этого внутренний преобразователь питания.

Поскольку основные узлы первичного преобразователя динамометрической системы выполнены на интегральных схемах (ИС) без дополнительных элементов, то разработка работоспособной схемы заключается в четком соблюдении инструкций производителя относительно стандартных схем включения этих ИС.

Принципиальная схема устройства приведена на рис.4.3, и внешний вид первичного преобразователя системы диагностирования приведен на рис.4.4.

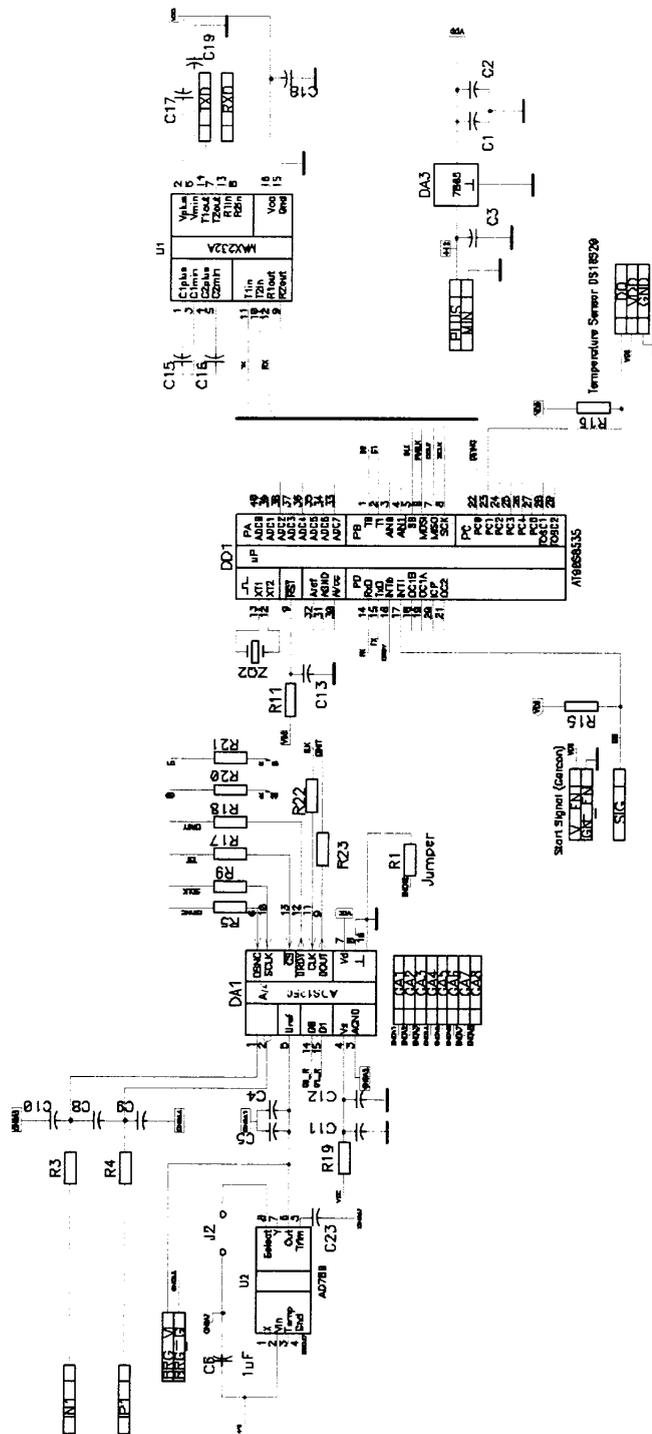


Рис. 4.3. Принципиальная электрическая схема системы диагностирования ГНШУ

Топология печатной платы для цифровой части устройства особенностей не имеет и потому трассировка проводников может выполняться в автоматическом режиме с помощью САПР. Аналоговая и аналого-цифровая часть схемы, которая включает в себя АЦП ADS1250, при необходимости достижения максимальной разрядности требует применение специальной технологии трассировки. Суть ее заключается в звездообразной физической модели трассы общего проводника GND, где лучи "звезды" проходят от общей точки к каждому аналоговому элементу схемы. Это уменьшает эффект наведения паразитарных потенциалов от токов внешних цепей, этим самым уменьшая значение собственного шума.

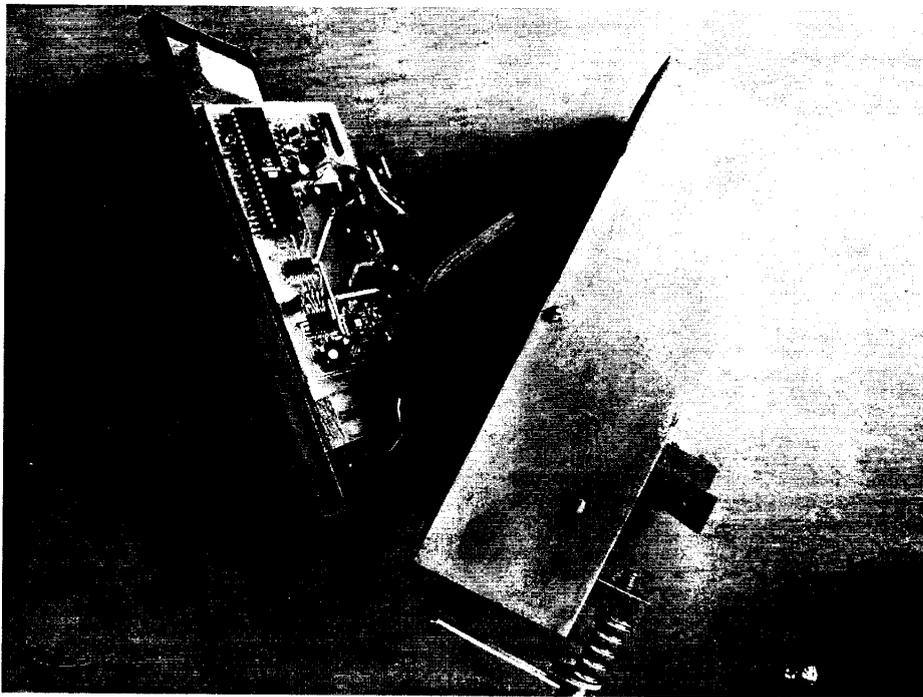


Рис. 4.4. Внешний вид первичного преобразователя системы диагностирования ГНШУ. Вид со снятой защитной крышкой.

4.3. Разработка программного обеспечения системы диагностирования ГНШУ

4.3.1. Разработка программного обеспечения устройства преобразования измерительной информации

Программа для микроконтроллера написана на языке Си с использованием компилятора CodeVision AVR и обеспечивает измерение нагрузки на полированный шток СК и сигнала начала цикла по запросу от управляющего устройства (управляющей ЭВМ). Блок-схема программы приведена на рис.4.5, текст программы – в приложении В1. В основном цикле программы происходит ожидание прихода управляющего байта по последовательному интерфейсу RS-232. В зависимости от его значения осуществляется передача подтверждения связи или измерение и передача значений нагрузки. Кроме того, возможны передача номера рабочего цикла станка-качалки и температуры окружающей среды. Нормальный режим работы устройства задается управляющим байтом 0x02 и предусматривает выполнение следующих действий:

1. удвоенное измерение нагрузки по нулевому каналу;
2. передача вычисленного значения нагрузки по последовательному интерфейсу RS232 к управляющему устройству.

Прием данных от внешнего АЦП осуществляется по прерыванию INT0.

Для отслеживания начала цикла качания СК используется внешнее прерывание INT1, которое вызывается по фронту нарастания импульсного сигнала SIG от магнитоуправляемого контактного датчика, в качестве которого использован геркон.

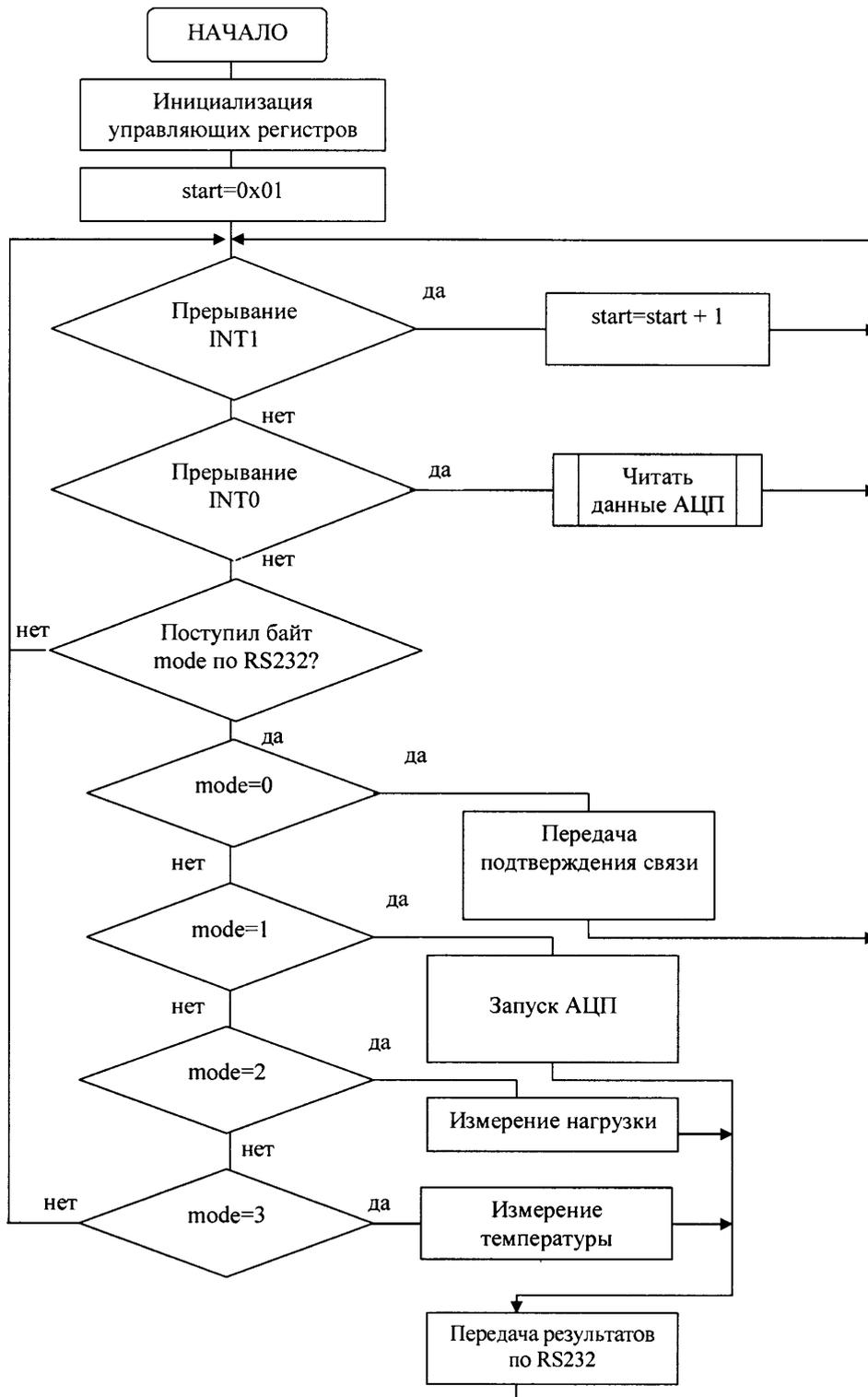


Рис. 4.5. Блок-схема программы устройства преобразования измерительной информации

4.3.2. Разработка программного обеспечения для ЭВМ высокого уровня

Программное обеспечение рассмотренной системы динамометрирования (рис.4.6) реализует достаточно простой процесс управления сбором и обработкой данных и удобный интерфейс пользователя. Элементы управления сгруппированы за функциональным назначением и расположены в порядке их использования. Задействованы “быстрые клавиши” для удобного выполнения основных операций.

Процедура получения динамограммы с помощью описанной системы включает следующие этапы:

1. Выбор скважины из списка скважин, основные параметры которых сохраняются в базе данных. Основные эксплуатационные параметры в этом окне выводятся для справки. Для редактирования базы данных служат кнопки “Открыть базу данных” и “Добавить скважину”.

2. Выбор конфигурации системы. Кнопка «Тест» в этом окне предназначенная для проверки правильности функционирования датчика перемещения и микроконтроллера.

3. Измерение нулевой линии, веса штанг и веса жидкости.

Необходимость измерения нулевой линии объясняется тем, что использованный в системе датчик нагрузки измеряет лишь динамическую деформацию полированного штока относительно начального деформированного состояния, то есть не учитывается составляющая деформации, predeterminedенная весом колонны штанг. Потому для получения абсолютных значений нагрузки необходимо предварительно измерить нагрузку на полированный шток при полностью разгруженных штангах, что, однако, не всегда возможно в условиях нефтепромысла в связи с отсутствием

необходимого оборудования. Если нулевая линия не была измерена, значение разницы между весом штанг и нулевой линией определяется теоретически на основе параметров штанговой колонны и колонны НКТ, которые сохраняются в базе данных. Так же теоретически могут быть определены и значения веса штанг и веса жидкости, если они не были измерены.

3. Ввод времени записи динамограммы (в секундах или количестве периодов).

4. Запуск процедуры чтения данных (кнопка “Старт”).

5. Сохранение файла динамограммы (кнопка “Сохранить файл”).

После завершения процедуры чтения данных в главном окне отображается динамограмма за первый период качки. Если было записано больше одного периода, динамограммы за другие периоды можно пересмотреть, выбирая номер периода в окошке “Цикл” или нажимая кнопки. При необходимости можно выполнить процедуру сглаживания, отметив переключатель в окне 8.

В окне 7 отображаются параметры динамограммы для текущего периода. Максимальная и минимальная нагрузка (далее P_{max} и P_{min}), длительность цикла качки и количество качек за минуту определяются непосредственно из динамограммы. Вес штанг и вес жидкости являют собой результат измерений, проведенных в п.3, а в случае, когда эти измерения не были проведены, – результат теоретического обсчета согласно формул

$$m_p = \rho_p F_n L, \quad m_{st} = \rho_{st} F_{st} L,$$

где F_n, F_{st} – площадь сечения плунжера и колонны штанг;

L – глубина спуска насоса;

ρ , cst – густота жидкости и материала штанг (произведение вычисляется как сумма произведений для длин отрезков колонны штанг с разными диаметрами).

На основе этих двух величин на графике строится теоретическая (параллелограммная) динамограмма (см. рис.4.6). Построение теоретической динамограммы может быть отключено путем выключения переключателей “Вес штанг” и “Вес жидкости” в окне 6.



Рис. 4.6. Внешний вид главного окна программы

Третий переключатель – “нулевая линия” – позволяет пересматривать динамограмму как в масштабе $0..P_{\max}$ (переключатель включен, см. рис.4.6), так и в масштабе $P_{\min}..P_{\max}$ (переключатель отключен). Вторым режимом удобен тем, которое дает более четкое представление о форме динамограммы при условиях, когда вес жидкости значительно меньше, чем вес штанг. Кроме автоматического масштабирования (по умолчанию), существует возможность задания фиксированных масштабов 0,4 т и 0,8 т для удобства сравнения динамограмм с разными максимальными нагрузками. Программа имеет три режима просмотра результатов измерения – в виде динамограммы $P(S)$, сигнала нагрузки как функции времени $P(t)$ и перемещение как функции времени $S(t)$.

С целью обеспечения возможности использования данного программного обеспечения для оперативного динамометрирования ГНШУ в его состав включен расчет коэффициентов подачи и наполнения глубинного насоса и фактической подачи за цикл, что традиционно используются в практике нефтедобычи для оценки дебита скважины. Коэффициент подачи определяется как отношение длины хода плунжера к длине хода полируемого штока [112], причем длина хода плунжера определяется из измеренной динамограммы. Коэффициент наполнения вычисляется как отношение площади динамограммы, полученной интегрированием кривой $P(S)$, к площади идеальной теоретической динамограммы, которая определяется как

$$F_{теор} = m_p (S - \lambda), \quad (4.1)$$

где λ – суммарное удлинение колонны штанг и колонны НКТ,

S – длина хода полированного штока.

Фактическая подача за цикл вычисляется по формуле

$$q_{\text{факт}} = F_n(S - \lambda)\rho_p = \frac{F_{\text{теор}}}{L} \quad (4.2)$$

Текст программы динамометрирования приведен в дополнении В1.

Параметры скважин заносятся в локальную базу данных программы. База данных содержит информацию о глубине спуска насоса, длине примененных НКТ диаметрами 60,73,89 и 102 мм., длине штанг диаметрами 16, 19, 22, 25 мм. Кроме того, туда заносятся данные о диаметре насоса, количестве качаний станка-качалки в мин, длине хода, радиуса кривошипа СК, длине переднего и заднего плеч балансира, длине шатуна, плотности жидкости, пластовом и забойном давлениях, а также о режиме работы скважины, который включает в себя время откачки жидкости и время накопления. База данных скважины также содержит информацию о её профиле, который заносится для каждого номера точки по координатно. Форма для работы со скважинами вызывается из главного меню основной программы по вкладке «Скважины». Внешний вид формы для работы с базой данных представлен на рис.4.7.

Параметры скважин	
Скважина	5-420
Глубина спуска насоса, м	2000
НКТ 60 мм	
НКТ 73 мм	2000
НКТ 89 мм	
НКТ 102 мм	
Штанги 16 мм	
Штанги 19 мм	2000
Штанги 22 мм	
Штанги 25 мм	
Диаметр насоса, мм	32
Количество качаний в мин.	5
Длина хода, м	3
№ точки профиля скважины:	1
Координата X, м	10
Y, м	0.53
Z, м	0.47
Радиус кривошипа, м	1
Длина переднего плеча балансира, м	1
Длина заднего плеча балансира, м	1
Длина штанна, м	1
Плотность жидкости, кг/м ³	900
Пластовое давление, МПа	
Забойное давление, МПа	
Время откачки, час.	
Время накопления, час.	

Рис. 4.7. Окно формы для работы с базой данных скважин

Для производства установки датчика на полированный шток используется форма установки и калибровки датчика, которая вызывается из основной программы путем нажатия кнопки «Установка датчика». Форма установки и калибровки датчика представлена на рис.4.8.

Форма установки и калибровки датчика

Опрос датчика 0

Интервал между опросами сек

Поточное значение: 10056 (ед. АЦП) 3,913 (в тоннах)

Запомнить значение Запомнить значение

Нулевая линия (штанги разгружены)

Вес штанг

Вес жидкости

Рис. 4.8. Окно формы установки и калибровки датчика

Форма обеспечивает автоматическое снятие данных в процессе затяжки установочного винта П-подобной скобы датчика, причем текущее значение отображается как в цифровом виде, так и в графическом. В последнем случае горизонтальный указатель смещается в ту, или иную сторону от нулевой отметки, при отклонении установочного винта от нулевой («0») отметки. Для калибровки расчетной системы программы, форма позволяет вводить значения кода АЦП, соответствующие весу штанг, весу жидкости, и отсутствию нагрузки в штангах. Причем значения могут быть введены автоматически, полуавтоматически, или в ручном режиме. Опрос датчика включается/выключается выбором/снятием соответствующего флажка на форме. При включенном режиме опроса датчика, данные автоматически изменяют текущее значение кода АЦП, которые можно зафиксировать как значение, соответствующее значению в тоннах, нажатием кнопки «Запомнить значение» под текущим значением кода АЦП. Значения веса штанг и веса жидкости в тоннах, подставляются в соответствующее поле ввода автоматически из базы данных при переключении переключателя «Нулевая линия/ вес штанг/ вес жидкости». Значение может быть оперативно изменено, при наборе числа вручную и нажатии кнопки «Запомнить значение» под введенным числовым полем. В случае выхода измеренного значения за допустимые пределы, которые устанавливаются для каждого конкретного датчика индивидуально в зависимости от разброса параметров, использованных в мостовой схеме тензорезисторов, калибровочная форма изменяет свой цвет на красный, что указывает на необходимость более точной затяжки скобы датчика на полированном штоке (см. рис.4.9).

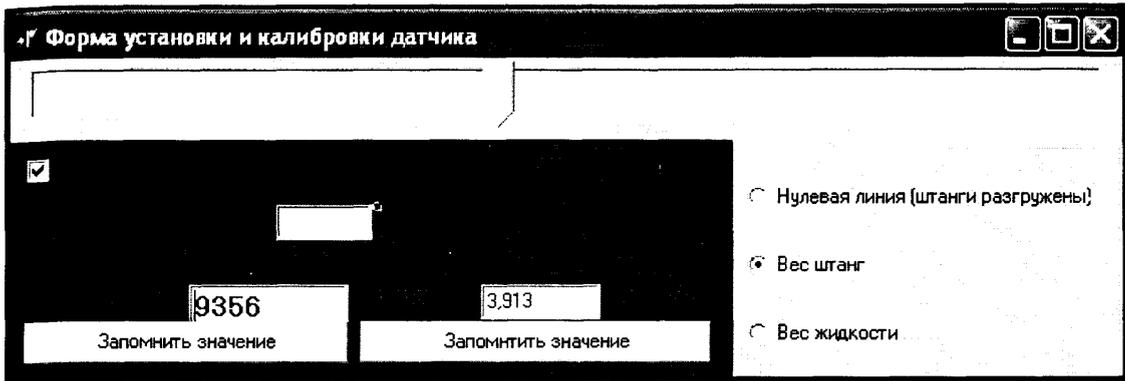


Рис. 4.9. Неточная установка динамометрического датчика

4.4. Определение погрешности измерительного преобразователя системы диагностирования ГНШУ

Исходя из структурной схемы измерительного преобразователя (рис. 4.10), можно считать, что аддитивная погрешность прибора предопределена погрешностями тензодатчиков и погрешностью смещения нуля АЦП, а мультипликативная – колебаниями напряжения питания и температурной чувствительностью датчиков, коэффициентом усиления внутреннего усилителя АЦП и внутренним сопротивлением мультиплексора. Поскольку опорное напряжение тензомостов, мультиплексора и АЦП формируется высокостабильным источником опорного напряжения AD780, колебания напряжения питания фактически не влияют на точность измерений. Исходное напряжение AD780 имеет слабую нелинейную зависимость от температуры, однако погрешность во всем диапазоне температур не превышает 0,003 % и имеет знак, противоположный знаку температурной погрешности АЦП и мультиплексора. Следовательно, пренебрежение этой составляющей не приведет к общему снижению оценки погрешности.

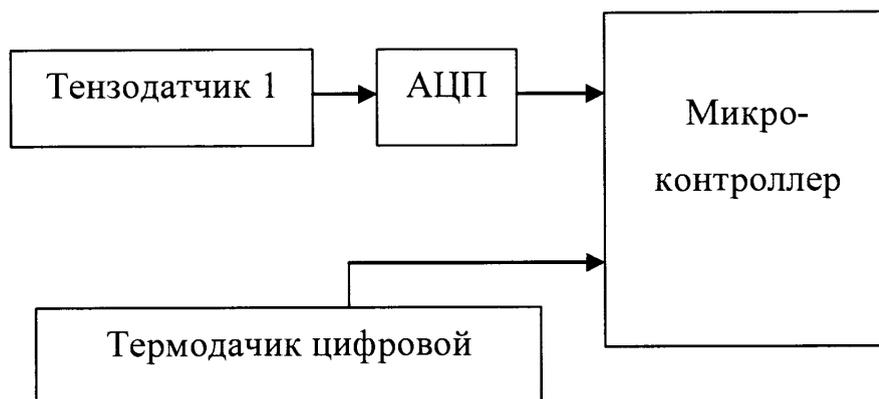


Рис. 4.10. Структурная схема измерительного преобразователя

В качестве тензодатчиков использованы фольговые константановые тензорезисторы типа 2ФКП-5Ч200 с номинальным сопротивлением 200 Ом, предназначенные для работы в диапазоне температур $-50\dots+70$ °С. Тензорезисторы подключены по полномостовой схеме, что позволяет считать в первом приближении нелинейность схемы преобразования близкой к нулю и минимизировать влияние паразитарных температурных влияний. Для оценки погрешностей, вносимых тензорезистивным преобразователем, рассмотрим метрологические характеристики тензорезисторов [113], приведенные в табл.4.1.

Отклонение сопротивления тензорезистора от номинального не влияет на погрешность измерения, поскольку коэффициент преобразования тензометрической схемы (зависит от сопротивления) определяется экспериментально для каждого датчика путем тарирования. Учет ползучести имеет смысл при измерении статических деформаций, поскольку нагрузка на полируемый шток в течение цикла качки носит динамический характер, эту характеристику можно не учитывать.

При наличии случайной погрешности чувствительности каждого из тензорезисторов из СКО 0,02 % погрешность исходного сигнала также составляет $\sigma_T = 0,02$ %, что обусловлено прямопропорциональной

зависимостью исходного напряжением тензомоста от изменения сопротивления тензорезистора.

Таблица 4.1

Метрологические характеристики тензорезисторов

Метрологическая характеристика	Параметр нормировки	Значение параметра
Сопротивление тензорезистора	Граничное относительное отклонение сопротивления в партии от номинального, %	0,35
Чувствительность при нормальных условиях	Среднее значение	1,9...2,3
	Среднеквадратическое отклонение, %	0,02
Температурный коэффициент чувствительности	Среднее значения, % / °C	0,8...1,1
	Среднеквадратическое отклонение, % / °C	0,02
Ползучесть при нормальных условиях	Среднее значение, % / час	0,5

С целью минимизации температурного влияния в схему введен цифровой термодатчик DS1820, измерение при помощи которого осуществляется перед началом измерения нагрузки. Термодатчик осуществляет передачу данных в последовательном цифровом коде в микроконтроллер. Полученное значение используется для температурной компенсации погрешности чувствительности тензорезисторов исходя из предположения, что чувствительность всех резисторов под действием температуры изменяется на одинаковую величину. Это значит, что при определении температурной погрешности тензодатчиков

следует учитывать лишь СКО дополнительной температурной погрешности чувствительности $\sigma_{\text{тгч}} = 0,02 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$.

Распределение температуры окружающей среды являются композицией двух нормальных распределений с энтропийным коэффициентом $k = 1,95$ и средним отклонением от математического ожидания $\Delta T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [114]. Следовательно, температурная составляющая погрешности чувствительности составляет $\sigma_{\text{тг}} = 0,02 \cdot 20 = 0,4 \text{ \%}$.

Чувствительность устройства при измерении нагрузки на полированный шток S , определенная экспериментально, составляет 0,6 единиц на килограмм. Тогда для максимального усилия $F_{\text{max}} = 100 \text{ кН}$ исходный код АЦП составляет $N_{\text{max}} = S \cdot F_{\text{max}} = 6 \cdot 10^4$.

Интегральная погрешность нелинейности АЦП составляет $\gamma_1 = 0,0012 \text{ \%}$ полной шкалы, то есть $\gamma_{\text{нел}} = \gamma_1 \cdot 2^M / N_{\text{max}} = 0,0012 \cdot 2^{20} / 6 \cdot 10^4 = 0,021 \text{ \%}$ от диапазона входных напряжений. Погрешности этого типа подчиняются нормальному закону распределения [115] с энтропийным коэффициентом $k = 2,066$. Тогда СКО погрешности нелинейности $\sigma_{\text{нел}} = \gamma_{\text{нел}} / k = 0,021 / 2,066 = 0,01 \text{ \%}$. СКО случайной погрешности, предопределенной внутренним шумом АЦП, составляет $2,8 \cdot 10^{-6}$ от полной шкалы, которая $\sigma_{\text{ш}} = 2,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2^{20} / 6 \cdot 10^4 \cdot 100 = 0,005 \text{ \%}$ от диапазона входных напряжений. Закон распределения этой погрешности – нормальный ($k = 2,066$).

Погрешность смещения нуля АЦП составляет $100 \cdot 10^{-6}$ от полной шкалы, которая составляет $\gamma_{\text{др}} = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 2^{20} / 6 \cdot 10^4 \cdot 100 = 0,174 \text{ \%}$ от диапазона входных напряжений. Закон распределения погрешности – равномерный (энтропийный коэффициент $k = 1,73$), следовательно, СКО этой погрешности

$$\sigma_{\text{др}} = \gamma_{\text{др}} / k = 0,174 / 1,73 = 0,1 \text{ \%}. \quad (4.3)$$

Температурный дрейф нуля АЦП составляет $\psi_{FSR}=0,25 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ от полной шкалы, которая составляет $\psi_1 = \psi_{FSR} \cdot 2^M / N_{max} = 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot 2^{20} / 6 \cdot 10^4 \cdot 100 = 0,0004 \%$ от диапазона входных напряжений. Температурный дрейф коэффициента усиления внутреннего усилителя АЦП составляет $\psi_{FSR}=5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ от полной шкалы, которая составляет $\psi_2 = \psi_{FSR} \cdot 2^M / N_{max} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 2^{20} / 6 \cdot 10^4 \cdot 100 = 0,0087 \%$ от диапазона входных напряжений. Таким образом, температурная составляющая мультипликативной погрешности $\gamma_{МАЦП} = \Delta T \cdot \psi_2 = 20 \cdot 0,0087 = 0,17 \%$, а аддитивной погрешности $\gamma_{ААЦП} = \Delta T \cdot \psi_1 = 20 \cdot 0,0004 = 0,008 \%$. СКО этих погрешностей составляют соответственно $\sigma_{МАЦП} / k = 0,17 / 1,95 = 0,09 \%$ и $\sigma_{ААЦП} = \gamma_{ААЦП} / k = 0,008 / 1,95 = 0,0041 \%$.

Температурные погрешности всех элементов схемы являются коррелируемыми и потому складываются алгебраически. Таким образом, СКО мультипликативной температурной погрешности

$$\sigma_T = \sigma_{TT} + \sigma_{МАЦП} = 0,4 + 0,09 = 0,49 \%. \quad (4.4)$$

Остальные погрешности являются независимыми и их СКО складываются геометрически:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_{ТЧ}^2 + \sigma_{НЕЛ}^2 + \sigma_{Ш}^2 + \sigma_{ААЦП}^2} = \\ &= \sqrt{0,49^2 + 0,02^2 + 0,01^2 + 0,005^2 + 0,0004^2} = 0,491\%. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Энтропийный коэффициент этой композиции можно принять равным 2,066 в связи с тем, что совокупность большого количества составляющих погрешности дает распределение, близкое к нормальному [116]. Следовательно, энтропийное значение суммарной приведенной погрешности составляет

$$\gamma = \sigma \cdot k = 0,491 \cdot 2,066 = 1,013 \%. \quad (4.5)$$

4.5. Определение показателя готовности системы диагностирования ГНШУ

Особенностью диагностирования ГНШУ по динамограмме является несоответствие формы реальному техническому состоянию штанговой колонны, обусловленному влиянию, в основном, формы ствола скважины, что отличалось в гл.1.1. Указанное обстоятельство приводит к искажению диагноза при интерпретации результатов диагностирования. Разработанный метод контроля состояния штанговой колонны позволяет получить динамограмму, которая более точно отображает реальное состояние ГНШУ и тем самым, повысить достоверность диагностирования.

Для оценки влияния разработанного метода на повышение достоверности диагностирования ГНШУ рассмотрим модель взаимодействия технических средств диагностирования ТСД с объектом диагностирования (ОД) – ГНШУ с учетом возникновения ошибок при постановке диагноза.

Построение модели взаимодействия элементов СД необходимо начинать с изучения условий использования и эксплуатации ОД и ТСД и особенностей процесса взаимодействия ОД, ТСД и человека-оператора (ЧО) в системе диагностирования [117].

Взаимодействие элементов системы диагностирования в данном случае можно представить следующей схемой [118] (рис.4.11).

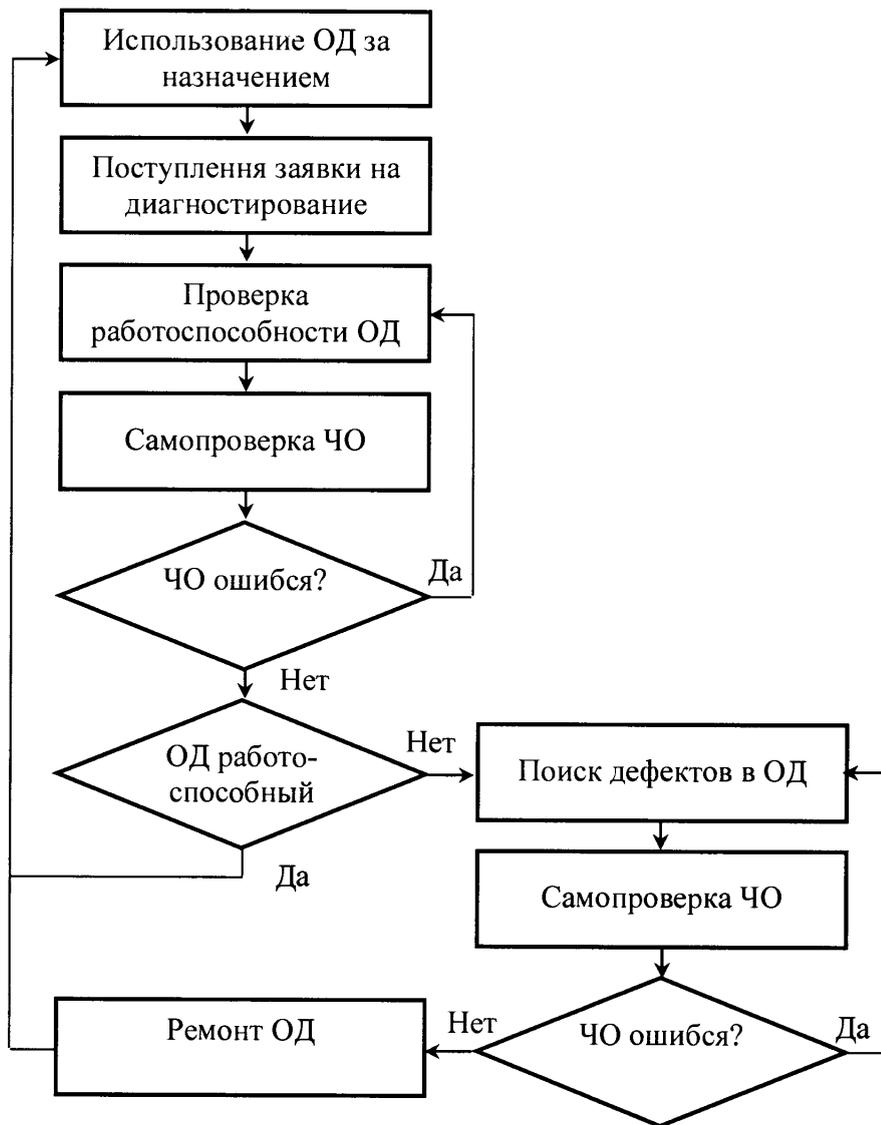


Рис. 4.11. Схема взаимодействия элементов системы диагностирования

При поступлении заявки на диагностирование ОД переводится в специальный режим, в котором ЧО проверяет его работоспособность. После проверки работоспособности объекта ЧО проверяет правильность выполнения алгоритма работоспособности ОД. В случае ошибок ЧО при проверке работоспособности ОД алгоритм повторяется. Если интерпретация результата диагностирования является безошибочной, а ОД работоспособным, то он

переводится в рабочий режим, если ОД – не работоспособный то оператор переходит к поиску причины дефекта (низкая посадка плунжера, негерметическая НКТ и т.п.). После поиска причины неработоспособности ОД ЧО проверяет правильность алгоритма поиска дефектов. В случае возникновения ошибок, алгоритм повторяется. В противном случае проводятся ремонтные работы с ОД.

По результатам анализа взаимодействия элементов системы диагностирования (СД) необходимо обнаружить множественное число возможных состояний СД. Даная СД может находиться в одном из двух возможных начальных состояний:

- 1) ОД работоспособный;
- 2) ОД неработоспособный.

При определении начальных состояний влиянием ЧО можно пренебречь, поскольку его основные свойства – безошибочность и быстроедействие – не влияют на число начальных состояний СД, а проявляются уже в процессе диагностирования.

Для каждого из начальных состояний построим циклограммы взаимодействия элементов СД во времени (рис.4.12).

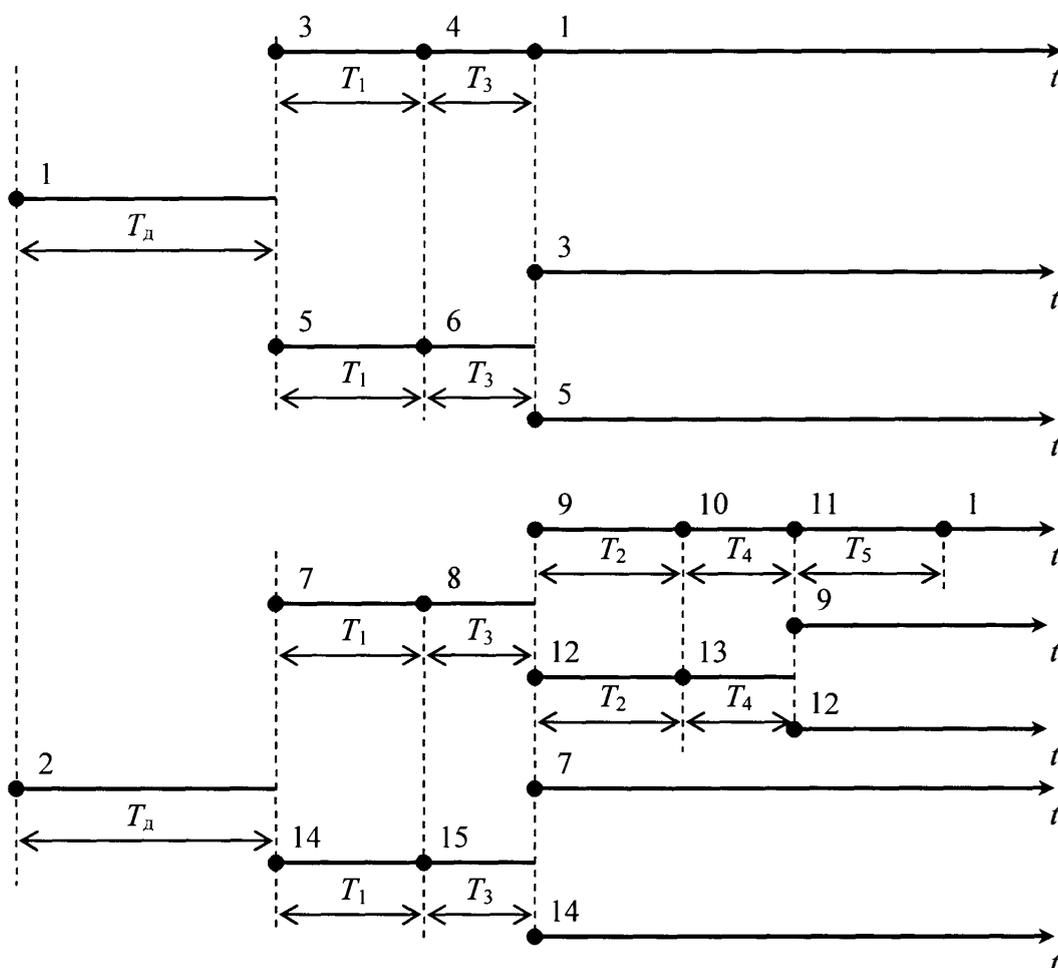


Рис. 4.12. Циклограмма взаимодействия элементов СД

На циклограмме (рис.4.12) учитываются состояния системы, которые приведены в табл.4.1 , и приняты следующие обозначения:

T_d – период диагностирования;

$T_1 = \tau_k$ – средняя длительность выполнения процедуры проверки работоспособности ОД;

$T_2 = \tau_d$ – средняя длительность выполнения оператором процедуры поиска дефектов в ОД;

$T_3 = \tau_{с.к.п}$ – средняя длительность самопроверки ЧО своих действий после проверки работоспособности ОД;

$T_4 = \tau_{с.к.д}$ – средняя длительность самопроверки ЧО своих действий после поиска дефектов в ОД;

$T_5 = \tau_p$ – средняя длительность ремонта ОД.

Таблица 4.2

Состояния СД

№	Состояние объекта диагностирования
1	Работоспособный ОД находится в рабочем режиме
2	Неработоспособный ОД находится в рабочем режиме
3	Проверяется работоспособность работоспособного ОД
4	Работоспособный ОД в специальном режиме ожидает перевода в рабочий режим во время самопроверки ЧО свои действий
5	Проверяется работоспособность работоспособного ОД (возможна ошибка ЧО при интерпретации динамограммы)
6	Работоспособный ОД в специальном режиме ожидает перевода в рабочий режим во время самопроверки ЧО своих действий (возможна ошибка ЧО)
7	Проверяется работоспособность неработоспособного ОД
8	Неработоспособный ОД в специальном режиме ожидает возобновление во время самопроверки ЧО своих действий
9	Поиск дефектов в неработоспособном ОД
10	Неработоспособный ОД в специальном режиме ожидает устранения дефектов во время самопроверки ЧО своих действий
11	Восстановление ОД
12	Поиск дефектов в неработоспособном ОД (возможна ошибка ЧО)
13	Неработоспособный ОД в специальном режиме ожидает устранения дефектов во время самопроверки ЧО свои действий (возможна ошибка ЧО)
14	Проверка работоспособности неработоспособного ОД (возможна ошибка ЧО)
15	Неработоспособный ОД в специальном режиме ожидает возобновление во время самопроверки ЧО свои действий (возможна ошибка ЧО)

С целью построения модели взаимодействия элементов СД состояния 1 и 2 объединяем в состояние I – ОД, в котором возможен хотя бы один дефект, находится в рабочем режиме, ТСД отключены, действия ЧО не связаны с процессом диагностирования.

Состояния 3 и 5 объединяем в состояние II, которое отвечает проверке работоспособности работоспособного ОД, ТСД в рабочем режиме, ЧО оператор выполняет алгоритм проверки работоспособности.

Состояние 7 и 14 объединяем в состояние III – проверка работоспособности неработоспособного ОД, ТСД в рабочем режиме, ЧО оператор выполняет алгоритм проверки работоспособности.

Состояниям 4, 6, 8 и 15 присваиваем номера IV, V, VI, VII.

Состояния 9 и 12 объединяем в состояние VIII, что отвечает поиску дефектов в неработоспособном ОД с учетом возможности возникновения ошибок при выполнении алгоритма поиска дефектов.

Состояниям 10, 13 и 11 присваиваем соответственно номера IX, X, XI.

Таким образом, число несовместимых состояний СД равно одиннадцати. Процесс перехода состояния СД из состояния в состояние представим в виде графа (рис.4.13), вершинами которого являются обобщенные состояния СД, а операторами веток – вероятности перехода из состояния в состояние p_{ij} и время пребывания СД в соответствующем состоянии до перехода в следующее состояние $M(\tau_{ij})$.

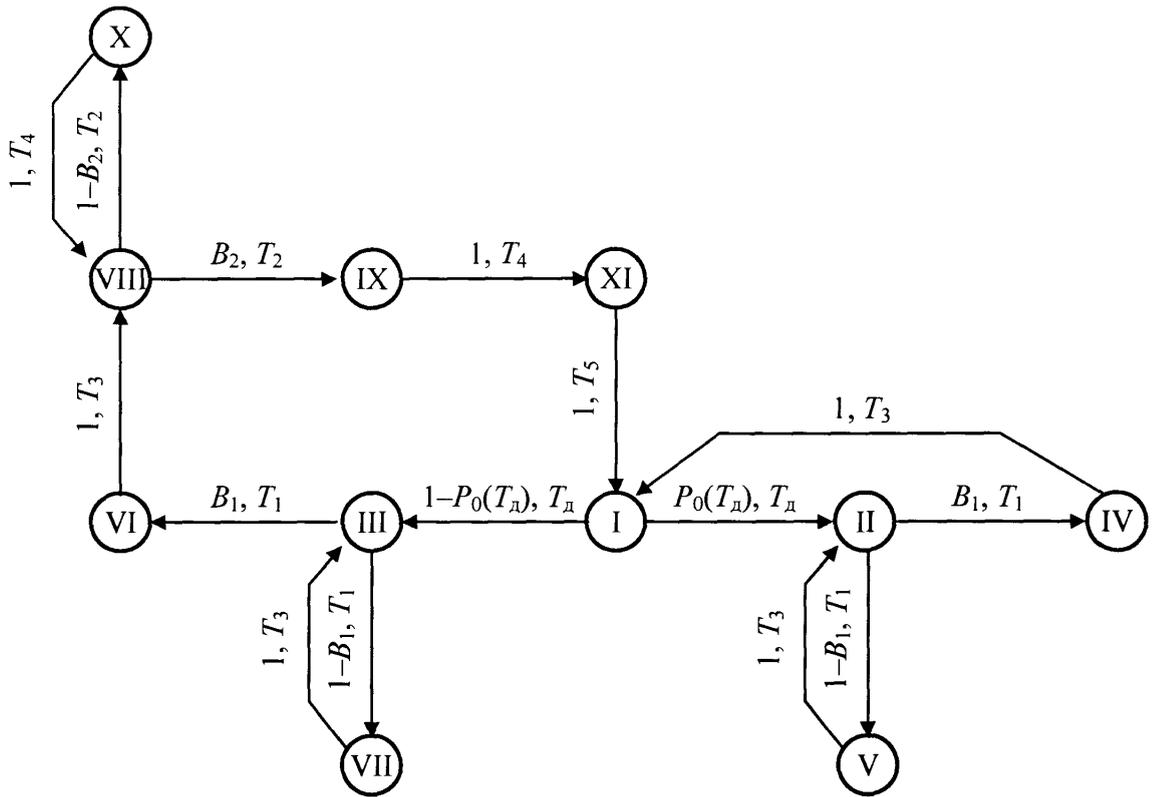


Рис. 4.13. Граф состояний СД

СД может перейти из состояния I в состояние II и III с вероятностями безотказной работы в течение периода диагностирования $P_0(T_d)$ и возникновения отказа на этом же периоде времени $[1-P_0(T_d)]$.

Из состояния II СД может осуществлять переходы в состояния IV и V, а из состояния III – в состояния VI и VII. Состояния IV и V, VI и VII отличаются между собой наличием ошибок во время проверки работоспособности ОД. Таким образом, вероятности перехода СД из состояния II в состояние IV и V и из состояния III в состояния VI и VII характеризует достоверность распознавания динамограммы при проверке работоспособности. Обозначим через B_1 вероятность безошибочного выполнения ЧО алгоритма контроля работоспособности и присвоим ветвям II–IV, III–VII и II–V, III–VII соответственно вероятности B_1 и $[1-B_1]$.

Из состояния VIII СД переходит в состояния IX и X, которые различаются между собой наличием ошибок при выполнении алгоритма поиска дефектов в ОД. Таким образом, вероятности переходов из состояния VIII в состояния IX и X характеризуют безошибочность ЧО при выполнении алгоритма поиска дефектов (отнесение динамограмм к классам, которые отвечают определенным дефектам ОД). Обозначим через B_2 вероятность безошибочного выполнения оператором алгоритма поиска дефектов и присваиваем веткам VIII–IX и VIII–X вероятности B_2 и $[1-B_2]$.

Из любого другого состояния СД может осуществить лишь переходы в одно или другое состояние, то есть вероятности данных переходов равны единицы.

На основе построенного графа состояний СД записываем систему уравнений согласно [119]

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= \pi_{11} + \pi_4, \\
 \pi_2 &= P_0(T_d)\pi_1 + \pi_5, \\
 \pi_3 &= [1-P_0(T_d)]\pi_1 + \pi_7, \\
 \pi_4 &= B_1 \pi_2, \\
 \pi_5 &= [1-B_1] \pi_2, \\
 \pi_6 &= B_1 \pi_3, \\
 \pi_7 &= [1-B_1] \pi_3, \\
 \pi_8 &= \pi_7 + \pi_{10}, \\
 \pi_9 &= B_2 \pi_8, \\
 \pi_{10} &= [1-B_2] \pi_8, \\
 \pi_{11} &= \pi_9.
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

Решаем систему (4.7) относительно π_1 и определяем для каждой из проверок отношения $A_i = \pi_i/\pi_j$

$$\begin{aligned}
 A_1 &= 1, \\
 A_2 &= \frac{P_0(T_d)}{B_1}, \\
 A_3 &= \frac{1 - P_0(T_d)}{B_1}, \\
 A_4 &= P_0(T_d), \\
 A_5 &= \frac{P_0(T_d)[1 - B_1]}{B_1}, \\
 A_6 &= 1 - P_0(T_d), \\
 A_7 &= \frac{[1 - P_0(T_d)][1 - B_1]}{B_1}, \\
 A_8 &= \frac{[1 - P_0(T_d)][1 - B_1]}{B_1 B_2}, \\
 A_9 &= \frac{[1 - P_0(T_d)][1 - B_1]}{B_1}, \\
 A_{10} &= \frac{[1 - P_0(T_d)][1 - B_1][1 - B_2]}{B_1 B_2}, \\
 A_{11} &= \frac{[1 - P_0(T_d)][1 - B_1]}{B_1}.
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Из совокупности состояний, в которых может находиться СД выбираем состояния, в которых ОД выполняет свои функции, – это состояние I. Таким образом, показатель готовности можно определить, как

$$\Pi_r = \frac{A_1 T_{01}}{\sum_{i=1}^{11} A_i T_i}, \quad (4.9)$$

где T_{01} – среднее значение безусловной длительности бездефектной работы ОД во время пребывания в состоянии I;

T_i – безусловная длительность пребывания СД в i -м состоянии, которая определяется, как

$$T_i = \sum_{j=1}^k p_{ij} M(\tau_{ij}), \quad (4.10)$$

k – количество состояний из которых возможен переход из i -го состояния.

Определим согласно (4.10), с учетом графа состояний (рис.4.13), длительности пребывания системы диагностирования в каждом из обобщенных состояний:

$$\begin{aligned} T_1 &= T_d, \\ T_2 &= T_3 = \tau_k, \\ T_4 &= T_5 = T_6 = T_7 = \tau_{с.к.п}, \\ T_8 &= \tau_d, \\ T_9 &= T_{10} = \tau_{с.к.д}, \\ T_{11} &= \tau_p. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Среднее значение безусловной длительности бездефектной работы ОД во время пребывания в состоянии II, можно определить через вероятность безотказной работы ОТ $P_0(t)$ как

$$T_{01} = \int_0^{T_1} P_0(t) dt \quad (4.12)$$

Учитывая, что во время нормальной эксплуатации вероятность безотказной работы ГНШУ можно представить экспоненциальным распределением с параметром $\lambda_0 = 1,6 \cdot 10^{-4}$ 1/час [21], выражение (4.12) можно записать в виде

$$T_{01} = \int_0^{T_1} \exp(-\lambda_0 t) dt = \frac{1}{\lambda_0} (1 - \exp(-\lambda_0 T_1)) \quad (4.13)$$

С учетом (4.8), (4.11) и (4.9) выражение для показателя готовности можно представить в следующем виде

$$P_r = \frac{\frac{1}{\lambda_0} (1 - \exp(-\lambda_0 T_1))}{T_d + \frac{1}{B_1} (\tau_k + \tau_{c.k.p.}) + \frac{[1 - P_0(T_d)][1 - B_1]}{B_1 B_2} (\tau_d + \tau_{c.k.d.}) + \frac{[1 - P_0(T_d)][1 - B_1]}{B_1} \tau_p} \quad (4.14)$$

Учет профиля скважины при расчетах динамограмм позволяет достичь более четкого распознавания состояния штанговой колонны, повысить точность диагноза и снизить количество ошибок ЧО при диагностировании. Проведенные экспериментальные исследования на нефтепромыслах НГДУ «Надворнаянефтегаз» показали, что применение разработанного метода диагностирования можно обеспечить вероятность безошибочного выполнения алгоритмов контроля работоспособности на уровне $B_1 = 0,9$, а алгоритмов поиска дефектов к $B_2 = 0,9$ за счет повышения достоверности информации и увеличения разрешающей способности классов дефектов.

Согласно результатам проведенных исследований разработанного метода диагностирования среднее время контроля работоспособности ГНШУ составляет 0,2 часа, среднее время поиска дефектов – 0,5 часа. В среднем ЧО необходимо 0,05 часа для проверки правильности выполнения алгоритмов контроля работоспособности и поиска дефектов.

Согласно данным по НГДУ «Надворнаянефтегаз» за 2005/06 годы средняя длительность ремонта одной ГНШУ составляла 600 часов.

Учитывая полученные данные можно определить оптимальный период диагностирования ГНШУ, который обеспечивает максимум показателя готовности (рис.4.14).

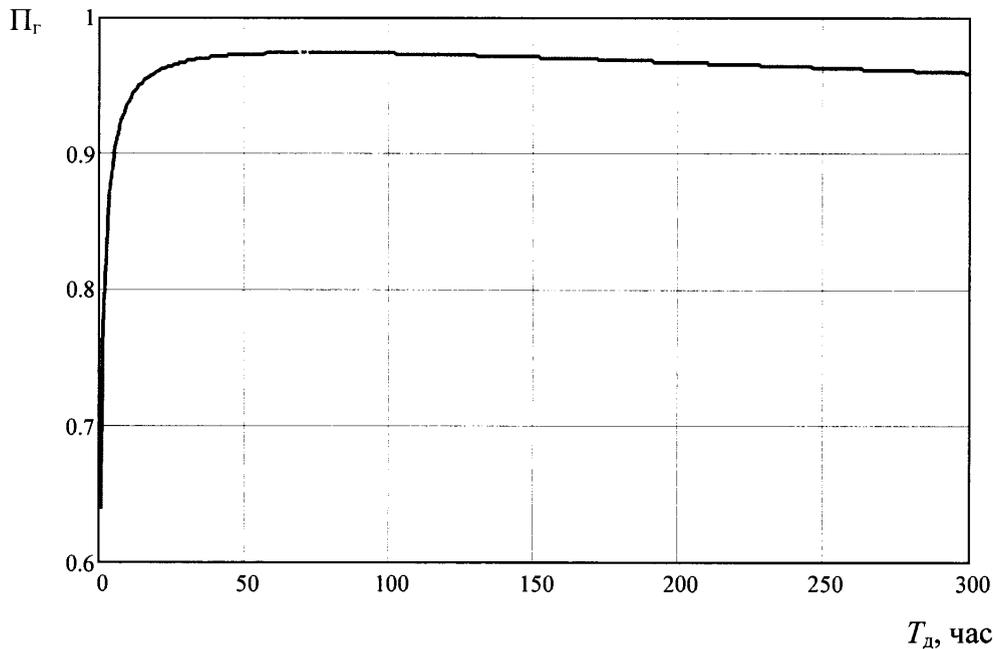


Рис. 4.14. График зависимости показателя готовности ГНШУ от периода диагностирования

Полученный график (рис.4.14) позволяет определить оптимальный период диагностирования ГНШУ, значение которого находится в границах от 70 до 100 часов (3-4 сутки).

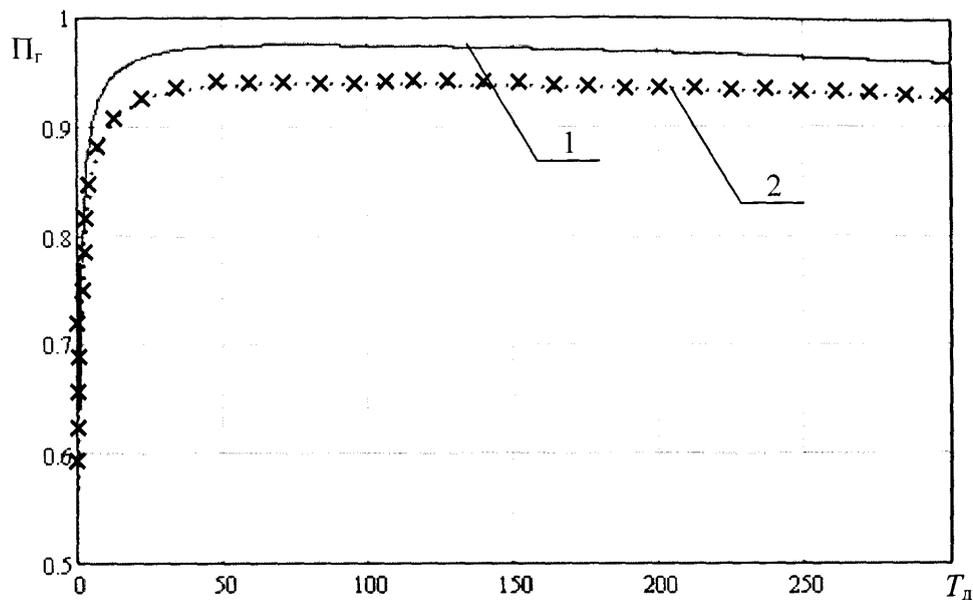


Рис. 4.15. Графики зависимости показателей готовности ГНШУ от периода диагностирования: 1 – при использовании разработанного метода диагностирования ГНШУ, 2 – при использовании традиционного метода.

Кроме того, повышение достоверности распознавания состояния ГНШУ за счет получения более точной динамограммы позволят в целом повысить показатель готовности установки, т.е. увеличивает вероятность нахождения установки в работоспособном состоянии. Так на рис.4.15 показаны для сравнения два графика зависимости $\Pi_r = f(m)$, полученные при использовании разработанного метода контроля состояния штанговой колонны с учетом ее спиралевидности и с использованием традиционного динамометрического метода. Как видно из графиков, использование разработанного метода позволяет повысить достоверность диагностирования состояния с 0.93 до 0.973, т.е. на 5,0 %.

4.6. Определение эффективности системы диагностирования ГНШУ

Одним из основных показателей эффективности диагностирования технических объектов является достоверность диагностирования, которая определяется как полная вероятность того, что СД оценивает именно то состояние, в котором действительно находится объект диагностирования [120].

Следует учитывать, что при диагностировании ГНШУ могут быть два случая правильного диагностирования: положительный D – установка работоспособна (в установке отсутствует дефект) и отрицательный \bar{D} – установка неработоспособная (в установке присутствует дефект).

Вероятности D и \bar{D} являются апостериорными вероятностями работоспособного и неработоспособного состояний установки.

Причинами неверной оценки состояния ГНШУ могут быть:

- оценивание ограниченного количества диагностических признаков;
- неидеальность технических средств в части их безотказности с учетом сбоев в элементах;
- неверно выбраны соотношения между допусками на диагностические показатели D и погрешностями измерения ε .

Полноту диагностирования можно выразить через вероятности обнаружения $q_{во}$ и необнаружения $q_{но}$ отказов, связанных соотношением:

$$q_{во} + q_{но} = Q_o, \quad (4.15)$$

где Q_o – вероятность отказа установки.

Согласно статистическим данным по отказам ГНШУ на нефтяных месторождениях НГВУ “Надворнаянефтегаз” интенсивность отказов установок

в среднем составляет $\lambda=1,6 \cdot 10^{-4}$ 1/год. Тогда вероятность отказа установки на протяжении периода диагностирования – $Q_o=0,011$.

Учитывая, что разработанный метод предназначенный для обнаружения отказов, связанных с возникновением дефектов в подземной части установки, и позволяет уверенно выявлять около 95 % отказов подземной части ГНШУ можно принять, что вероятность обнаружения отказа будет составлять соответственно 95 % от вероятности отказа подземной части установки. Следовательно, вероятность обнаружения отказов будет составлять $q_{во}=0,01$, а вероятность необнаружения отказа – соответственно $q_{но}=0,001$ (согласно (4.15)).

В результате различной физической природы и сильнейшей зависимости причин снижения достоверности от реальной структуры ТСД целесообразно выделять ошибки, которые возникают в результате конечной безотказности составных элементов ТСД и ошибки, которые обусловлены погрешностями ТСД. Причем, если в первом случае ошибки возникают в результате сбоев и отказов элементов ТСД, то во втором случае определяются законами распределения и принятыми допусками оцениваемых диагностических признаков.

Приведенные факторы имеют стохастическую природу, поэтому количественно оцениваются вероятностными характеристиками.

Сбои в системе диагностирования приводят к неверному функционированию ТСД, при этом их работоспособность возобновляется без внешнего воздействия. Учитывая полный самоконтроль ТСД можно допустить отсутствие ошибок при диагностировании по причине отказа ТСД во время диагностирования. Другие причины сбоев можно классифицировать следующим образом.

Сбои, которые возникают в элементах СД можно охарактеризовать:

– вероятностью сбоя, который приводит к ошибке типа «ложный отказ» (работоспособный объект считается неработоспособным) (событие h_1):

$$q_{\text{на}}^{\delta} = \frac{N^{\delta}}{N} \quad (4.16)$$

где N^{δ} – количество сбоев опытного образца СД, что приводят к ошибке типа «ложный отказ»;

N – общее количество исследований работоспособного ОД при значительном увеличении допусков на параметры, которые проверяются;

$q_{\text{на}}^{\delta}$ – вероятность сбоя, который приводит к ошибке типа «необнаруженный отказ» (неработоспособный объект считается работоспособным) (событие h_2):

$$q_{\text{на}}^i = \frac{N^i}{N}, \quad (4.17)$$

где N^i – количество сбоев опытного образцу СД, что приводят к ошибке типа «необнаруженный отказ».

При апробации СД было проведено около 120 испытаний системы, в результате чего была зафиксирована лишь одна ошибка типа «ложный отказ» и ни одной ошибки типа «необнаруженный отказ». Следовательно, вероятность события h_1 будет равна $q_{\text{сб}}^x = 0,0083$, а события h_2 равна $q_{\text{сб}}^n = 0$.

Отказы элементов системы могут приводить либо к полной потере работоспособности ТСД, либо ТСД могут продолжать функционирование, но выдавать результаты, не связанные с текущим состоянием объекта.

Диагностирование предусматривает выполнение ряда измерительных операций, в результате чего могут появляться ошибки первого и второго рода, которые определяются соответственно вероятностями α и β .

Вероятности α и β являются функциями погрешностей измерения σ_u , сравнения σ_c и законов распределения $f(\xi)$ значений диагностических признаков ξ .

При оценке состояния ОД по обобщенному диагностическому признаку вероятность α (событие h_3) можно определить как

$$\alpha = \int_0^{\infty} \left[\int_{\max(b-\varepsilon, a)}^b f_1(\xi) d\xi \right] f_2(\varepsilon) d\varepsilon + \int_{-\infty}^0 \left[\int_a^{\min(a-\varepsilon, b)} f_1(\xi) d\xi \right] f_2(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (4.18)$$

где a и b – соответственно нижняя и верхняя границы допуска на диагностический признак ξ ;

ε – погрешность измерения диагностического признака;

$f_1(\xi)$ – плотность деления значений диагностического признака ξ ;

$f_2(\varepsilon)$ – плотность деления значений погрешности ε .

Вероятность β (событие h_4) определяется формулой:

$$\beta = \int_0^{\infty} \left[\int_a^{\min(a, b-\varepsilon)} f_1(\xi) d\xi \right] f_2(\varepsilon) d\varepsilon + \int_{-\infty}^0 \left[\int_{\max(b, a-\varepsilon)}^b f_1(\xi) d\xi \right] f_2(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4.19)$$

В качестве закона распределения значений диагностического признака можно принять закон Вейбулла-Гнеденко с параметрами $k=1,8$ и $\alpha=0.0015$

Суммарная приведенная погрешность СД определяется, в основном, погрешностью первичных преобразователей и составляет, исходя из (4.5), 1 % и подчиняется нормальному закону распределения с нулевым средним значением и дисперсией $\sigma_2=0.577\%$.

Подставляя полученные значения в формулы (4.18) – (4.19) получим $\alpha=0,00016$, а $\beta=0,00012$.

Рассмотрим модели формирования правильного диагноза с учетом возможных отказов, сбоев и погрешностей.

В процессе диагностирования ОД может находиться в работоспособном (событие A) и неработоспособном (событие \bar{A}) состояниях соответственно с вероятностями P_0 и Q_0 . Состояние ОД оценивают технические средства, которые перед применением или в процессе диагностирования могут быть работоспособными (событие B) или перед применением или в процессе диагностирования в ТСД может возникнуть отказ (сбой), который приводит к неверной оценке состояния ОД (событие \bar{B}). Событие B может наступить вместе с любым событием h_i $i=1,4$.

Обозначим через C и \bar{C} события, которые заключаются в признании ОД за результатами диагностирования соответственно работоспособным и неработоспособным. Тогда вероятности D и \bar{D} можно определить за известными в теории вероятности формулами Байеса:

$$D = \frac{P(A)P(C/A)}{P(A)P(C/A) + P(\bar{A})P(C/\bar{A})}, \quad (4.20)$$

$$\bar{D} = \frac{P(\bar{A})P(\bar{C}/\bar{A})}{P(\bar{A})P(\bar{C}/\bar{A}) + P(A)P(\bar{C}/A)}, \quad (4.21)$$

где $P(A)$ и $P(\bar{A})$ – безусловные вероятности событий A и \bar{A} соответственно;

$P(C/A), P(\bar{C}/A), P(C/\bar{A}), P(\bar{C}/\bar{A})$ – условны вероятности соответствующих событий.

Для вычисления условных вероятностей рассмотрим модель формирования диагноза в виде ориентированного графа при условии, что все отказы ТСД выявляются во время самоконтроля. Вершины графа отвечают состояниям ОД, ТСД и системы в целом, а ветки характеризуют вероятности нахождения элементов в указанных состояниях (рис.4.16).

По вероятностному графу определяем условные вероятности:

Подставляя полученные значения условных вероятностей в (4.20) – (4.21), получим:

$$D = \frac{P_o^2(P_o + q_{\bar{n}a}^i)}{P_o^2(P_{\bar{n}} + q_{\bar{n}a}^i) + Q_o[q_{i.i} P_{\bar{n}} + Q_o(q_{\bar{n}a}^i + \beta)]}; \quad (4.22)$$

$$\bar{D} = \frac{Q_o[P_{\bar{n}}q_{a.i} + Q_oq_{\bar{n}a}^i]}{Q_i[P_{\bar{n}}q_{a.i} + Q_oq_{\bar{n}a}^{\delta}] + P_o^2(q_{\bar{n}a}^{\delta} + \alpha)}. \quad (4.23)$$

Как видим, достоверность диагностирования зависит не только от показателей инструментальной достоверности (α, β) и надежностных характеристик объекта и технических средств, но также от полноты диагностирования ($q_{в.о}, q_{н.о}$).

Подставляя в выражения (4.22) и (4.23) значения отдельных составляющих, получим значение достоверности диагностирования $D=0,96$, которое подтверждает высокую эффективность спроектированной СД.

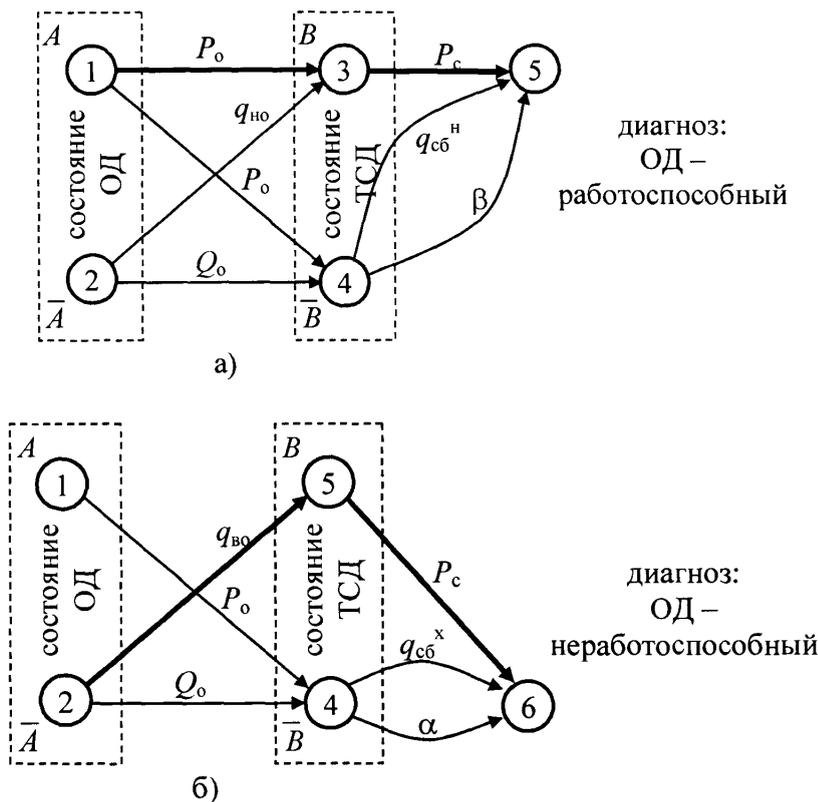


Рис. 4.16. Модель формирования правильного диагноза: а) при положительном результате, б) при отрицательном результате

Выводы к разделу

1. Создана соответствующая выдвинутым требованиям и условиям эксплуатации функциональная схема системы диагностирования ГНШУ, использование которой позволяет повысить оперативность и снизить трудоемкость проведения процесса диагностирования.

2. Разработан датчик нагрузки накладного типа, конструкция которого позволяет проводить его оперативную установку, а заложенные схемотехнические решения обеспечивают получение абсолютных значений усилия на полированный шток.

3. Разработаны блок-схема и принципиальная электрическая схема устройства обработки измерительной информации, позволяющего осуществлять

с заданной точностью обработку созданных алгоритмов диагностирования в реальном режиме времени.

4. Определена суммарная приведенная погрешность измерительного преобразователя датчика накладного типа, составляющая 1,037 %, что соответствует погрешности лучших образцов зарубежных датчиков аналогичного типа.

5. Предложена методика и проведен расчет показателя готовности разработанной системы диагностирования ГНШУ, учитывающий влияние человека-оператора и позволяющий определить оптимальный период диагностирования ГНШУ. Показано, что использование разработанного метода контроля состояния штанговой колонны с учетом ее спиралевидности позволяет повысить коэффициент готовности ГНШУ с 0,93 до 0,973.

6. Предложена методика и проведен расчет показателя эффективности разработанной системы диагностирования ГНШУ – достоверности диагностирования, который равен $D=0,96$, что подтверждает ее высокую эффективность.

ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная научно-техническая задача разработки метода контроля состояния штанговой колонны, находящейся под действием комплекса силовых факторов. Решение этой проблемы имеет существенное значение с точки зрения повышения достоверности результатов диагностирования ГНШУ и, как следствие – повышение их надежности при эксплуатации наклонных и наклонно-направленных скважин.

1. В результате проведенного анализа современного состояния диагностирования ГНШУ установлено: существующие динамометрические методы дают значительную погрешность, а в отдельных случаях – постановку неправильного диагноза при распознавании динамограмм и отнесении их к заранее определенным классам дефектов для ГНШУ, эксплуатирующихся в наклонных и наклонно-направленных скважинах, что обусловлено отсутствием диагностических моделей штанговой колонны, находящейся под действием комплекса силовых факторов и, как следствие – отсутствием эффективных методов контроля ее технического состояния, что определяет актуальность поставленных задач.

2. Создана общая модель процесса деформирования штанговой колонны в скважине с криволинейной осью, базирующаяся на восстановлении пространственной конфигурации ее оси с учетом спиралевидности и выведена формула для оценки критической силы, необходимой для приобретения указанной конфигурации, которая с достаточной для инженерных расчетов точностью (10-15) согласуется с известными зависимостями, однако имеет более простое математическое выражение и учитывает особенности штанговой колонны.

3. Исследовано напряженно-деформированное состояние штанговой колонны в прямолинейной скважине при потере устойчивости и получены

математические соотношения для оценки изменения длины колонны вследствие приобретения ею спиралевидной конфигурации и оценены критические параметры геометрии колонны, после чего возможен ее обрыв только вследствие изменения геометрии.

4. На основании созданных математических моделей процесса деформирования штанговой колонны и оценки сил сопротивления ее движению, учитывающих спиралевидность штанговой колонны и реальный профиль скважины, впервые разработан метод контроля состояния штанговой колонны, позволяющий повысить достоверность диагностирования состояния ГНШУ и прогнозировать также дефект типа „Обрыв штанг”.

5. Установлено, что вследствие спиралевидной деформации штанговой колонны фактическая длина хода плунжера изменяется на $10 \div 50\delta$, что может быть выявлено по динамограмме глубинного насоса и предложено аналитическое выражение для эталонной динамограммы нормальной работы ГНШУ, учитывающее эффект спиралевидности, на основании которого усовершенствован также алгоритм диагностирования ШГНУ по динамограмме путем расчета меры подобия между экспериментальной динамограммой и эталонными динамограммами различных технических состояний, позволяющий повысить достоверность диагностирования до 0,973.

6. В соответствии с выдвинутыми требованиями и условиями эксплуатации разработаны:

- функциональная схема системы диагностирования ГНШУ, использование которой позволяет повысить оперативность и снизить трудоемкость проведения процесса диагностирования;

- датчик нагрузки накладного типа, конструкция которого позволяет проводить его оперативную установку, а заложенные схмотехнические решения обеспечивают получение абсолютных значений

усилия на полированный шток. Суммарная приведенная погрешность измерительного преобразователя датчика накладного типа составляет 1.037 %, что соответствует погрешности лучших образцов зарубежных датчиков аналогичного типа;

- блок-схема и принципиальные электрические схемы устройства обработки измерительной информации, позволяющего осуществлять с заданной точностью обработку созданных алгоритмов диагностирования в реальном режиме времени.

7. Предложены методика и проведен расчет показателей готовности разработанной системы диагностирования ГНШУ, учитывающий состояние человека-оператора и позволяющий определить оптимальный период диагностирования ГНШУ, а также показателя ее эффективности – достоверности диагностирования. Показано, что использование разработанного метода контроля состояния штанговой колонны учетом ее спиралевидности, позволяет повысить показатель готовности ГНШУ с 0.93 до 0.973, а достоверность диагностирования $D=0.96$ подтверждает высокую эффективность разработанной системы.

8. Проведена апробация усовершенствованного алгоритма диагностирования на экспериментальных данных, полученных со скважин НГДУ «Надворнаянефтегаз». Результаты апробации свидетельствуют о повышении достоверности диагностирования вследствие учета спиралевидности для искривленных скважин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Адонин А.Н. Добыча нефти штанговыми насосами. – М.: "Недра", 1979. – 213 с.
2. Фаерман И.Л. Штанги для глубинных насосов.- Азнефтеиздат. – 1955. – 145 с.
3. Грабович В.П. Методика расчета штанговых колон для восточных нефтяных районов: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – М. – 1966. – 186 с.
4. Муравлев Н.М., Мищенко Н.Т. Насосная эксплуатация скважин за рубежом. – М.: «Недра», 1967. – 240 с.
5. Ваганов Ю.Г., Султанов Б.З. Исследования продольного изгиба низа колонны труб в штанговой глубинно-насосной установке //Тр. Ин-та /Уфимский нефтяной институт. – 1975. – С. 103 – 109
6. Сароян А.Е. Эксплуатация насосно-компрессорных труб. – М.: "Недра", 1983. – 116 с.
7. Уразанов К.Р. Эксплуатация наклонно-направленных скважин. – М.: "Недра", 1993. – 168 с.
8. Вагапов С.Ю., Султанов Б.З. Совместных продольный изгиб колонны НКТ и штанг при работе скважинного насоса. Нефтепромысловое оборудование. – 2001. – №2. – С. 64 – 66.
9. Касьянов В.М. К расчету штанговых колонн глубинно-насосных установок, – “Нефтяное хозяйство”, 1960, №3. – С. 51 – 54.
10. Круман Б.Б., Антоненко Н.М. Влияние радиальных гидростатических сил на напряжения в нижней части колонны насосных штанг. – “Нефтяное хозяйство”, 1918, №7. – С. 40 – 42.
11. Расторгуев М.А., Ситдыков Г.А, Скопов Ю.Ф. и др. Замеры осевых деформаций штанг при работе глубинного насоса. – РНТС “Машины и нефтяное оборудование”, – 1983, №4. – С. 37 – 41.

12. Лепехин Ю.Н. Анализ работы штанговых муфт, применяемых в наклонно-направленных скважинах. //Нефтепромысловое дело. Отечественный опыт: ЭИ ВНИИОЭНГ. – 1987. – №12.- С. 6 – 9.

13. Якимов С.Б. Изучение влияния угла наклона скважины на нагрузки в штангах по результатам динамометрирования скважинных штанговых насосов. //Нефтепромысловое дело. Отечественный опыт: ЭИ ВНИИОЭНГ. – 1986. – №12. – С. 8 – 10.

14. К вопросу определения давления у приема глубинного насоса и дефекта скважины по динамограмме. Аджалов З.М., Алиев Ш.Н., Мовланов Ш.С. и др. //Азербайджанское нефтяное хозяйство, – 1978 . – № 6 . – С. 23 – 25.

15. Вирновский А.С. Теория и практика глубинно-насосной добычи нефти. – М.: Недра, 1971. – 192 с.

16. Багиров Ф.Ш. Распознавание состояния станка-качалки на основе экспертной диагностики //Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1987. – №2. – С. 53 – 55.

17. Дрегешеску Н.Д. Глубинно-насосная добыча нефти. – М.: Недра, 1966. – 418 с.

18. Оборудование для добычи нефти и газа. Ивановский В.И., Дарищев В.И., Сабиров А.А. и др. – М.: ГУП Изд-во « Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – С. 42 – 792.

19. Прозур О.В. Деформація штанг і зменшення ходу плунжера у викривлених свердловинах. Науковий вісник ІФНТУНГ « Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ». – 2005. – №4 (17), – С. 68 – 72.

20. Ижмурзин А.А., Хоанг Тхинь Нян. Методика расчета крутящих моментов в трубах и штангах, возникающих при спуске в скважину с пространственным искривлением ствола Нефтепромысловое дело,- 2006.- [http:// www.ogbus.ru/ authors / Ishmurzin / Ishmurzin _1.gdj](http://www.ogbus.ru/authors/Ishmurzin/Ishmurzin_1.gdj).

21. Бандура В.В., Заміховський Л.М. Умови виникнення і розвитку дефектів глибинно-насосної штангової установки (ГНШУ) // ІФДТУНГ. – Івано-Франківськ, 1996. – 14с. – Укр. – Деп. в УкрІНТЕІ 04.10.96 р. №10 Ук96.
22. Євчук О.В. Вдосконалення динамометричного методу та технічних засобів діагностування штангових глибинно-насосних установок для видобутку нафти. Дис. на здобут. наук. ступ. канд. техн. наук. – Івано-Франківськ. – 2004. – 181 с.
23. Мамедов А.М., Саакянц А.М., Елчиев С.М. Определение факторов, влияющих на отказы глубинно-насосной установки. Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1988 .- № . – С. 32 – 35.
24. Молчанов А.Г. Нефтепромысловые машины и механизмы.- М.: «Недра». – 1983. – С.
25. Муравьев И.М., Базлов М.Н. и др. Технология и техника добычи нефти. М.: "Недра", 1971. – 496 с.
26. Щуров В.И. Технология и техника добычи нефти. М.: "Недра", 1983. – 294с.
27. Джабар-заде Д.А., Атакишев А.Н. Причины отказов в штанговых колоннах НГДУ «Азизбековнефть».- Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1981. – №10. – С. 54 – 57.
28. И.Г.Белов. Исследование работы глубинных насосов динамографом. – М.: Гостехиздат, 1960. – 126 с.
29. Акульшин А.И., Бойко В.С. и др. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин. М.: "Недра", 1989. – 480 с.
30. Бандура В.В. Дослідження впливу дефектів ШГНУ на її експлуатаційну надійність // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Нафтове обладнання. – Івано-Франківськ, – 1999. – Вип. 36 (т. 4). – С. 198 – 209.

31. Сабиров А.А., Фролов С.В. и др.. Влияние различных факторов на отвороты штанг в скважинах, оборудованных УСШН. Нефтепромысловое дело. – 2004. – № 1. – С. 30 – 33.
32. Бабушкина Т.М., Сюр Т.А. Изучение и проведение мероприятий по увеличению коррозионной стойкости деталей ШГН производства Пермской компании нефтяного машиностроения // Сб. докл. 1-й Пермский науч. – практ. конф. «Оборудование для нефтяной и газовой промышленности». – Пермь, 2000.
33. Добыча нефти глубинными штанговыми насосами : Ришмюллер Г. и др. – Шеллер – Блекманн Гмбх, – Терниц, Австрия. – 1988. – 230 с.
34. Пчелинцев Ю.В. Эксплуатация часто ремонтируемых наклонно-направленных скважин. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2000.
35. Кузнецов А.П., Акопян С.Ш. Повышение надежности глубинно-насосных штанг. Нефтяное хозяйство. 1969, №2. – С. 36 – 41.
36. Требин А.Г., Ледяев В.Г., Вейсман Э.Л. Результаты исследования разрушившихся при эксплуатации насосных штанг. //Нефтепромысловое дело. Отечественный опыт: ЭИ ВНИИОЭНГ. – 1987. – №7. – С.13 – 14.
37. Багиров М.М. Определение закона движения и усилий в колонне штанг при наличии амортизатора в точке подвеса колонны. Изв. ВУЗов «Нефть и газ». – 1983. – №8. – С. 75– 77.
38. Замиховський Л.М., Бандура В.В. Аналіз причин, що обумовлюють надійність глибинно-насосної штангової установки. // Методи і засоби технічної діагностики, – Івано-Франківськ. – 1995. – Вип. Х11. – С.204 – 2 .
39. Ухалов К.А. Исследование и моделирование показателей надежности глубинно-насосного оборудования в наклонно-направленных скважинах (на примере Кальчинского месторождения). Автореф. на соиск. уч. степени канд. тех. наук . – Тюмень. – 2005. – 24 с.

40. Устройства для уменьшения трения и механического износа насосных труб и штанг. К.Р. Уразаков, В.И. Абросимов, В.А. Рахматуллин, Н.Х. Мусин, А.Т. Цветков. //Нефтепромысловое дело. Отечественный опыт: ЭИ ВНИИОЭНГ. – 1987. – №12. – С. 12 – 13.

41. Якимов С.Б., Апасов Т.К., Локтев А.В. Определение допустимых напряжений для колонны насосных штанг скважин Самотлорского месторожде. //Нефтепромысловое дело. Отечественный опыт: ЭИ ВНИИОЭНГ. – 1987.-№10. – С. 9 – 12.

42. Узумов Э.И. Колебания незаякореных насосно-компрессорных труб при работе глубинного насоса. – Изв. вузов “Нефть и газ”, № 6, 1980 – С. 65 – 67.

43. Исмаилова Л.А., Кадиров Н.Б., Бадалов А.А. К вопросу кинематики станка-качалки. Тематич. сб. науч. трудов АзНИПИ нефти. Вопросы техники и добычи нефти. Баку, 1975 – С. 116 – 121.

44. Кадиров Н.Б. К вопросу исследования вынужденного колебательного движения колонны штанг станка-качалки глубинно-насосной установки. – Изв. вузов “Нефть и газ”, № 2, 1981 – С. 23 – 25

45. Кадиров Н.Б. К вопросу исследования вынужденного колебательного движения колонны штанг при работе глубинного насоса. – Изв. вузов “Нефть и газ”, № 8, 1983 – С. 25 – 31.

46. Касьянов В.М. Математический метод контроля работы глубинных штанговых насосов. ТНТО Сер. «Машины и оборудование нефтегазовой промышленности». – ВНИИОЭНГ, Москва, 1973 – 95 с.

47. Чарный И.А., Фрейдензон И.А., Арустамова Ц.Т. Динамический расчет штанг глубоких нефтяных насосов с учетом сил трения о насосные трубы. – Изв. АН СССР, ОТН, 1949, (т.6), С. 855 – 875.

48. Чарный И.А. исследование работы штанг глубоконасосных установок. Труды МНИ им. акад. И.М. Губкина, Вып.2, 1940 – С.129 – 136.

49. Пирвердян А.М. Гидромеханика глубиннонасосной эксплуатации. – М.: Недра, 1968 – 306 с.

50. Ковшов В.Д., Светланова С.В., Сидоров М.Е. Моделирование динамограммы станка-качалки – «Нефтепромысловое оборудование», №11, 2005-С. 84 – 87.

51. Алиев Т.М., Костянян В.Р., Тер-Хачатуров А.А. Об одном подходе к распознаванию неисправностей глубинного нефтяного насоса по динамограмме, инвариантной к пространственному положению осей координат. – Изв. Вузов «Нефть и газ», №8, 1983 – С. 60 – 67.

52. Рыскин Л.М., Тер-Хачатуров А.А. Алгоритм дихотомической диагностики штанговой глубиннонасосной установки «Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности», №6, 1982 –С. 74 – 78.

53. Байков И.Р., Смородов Е.А., Деев В.Г. Анализ временных рядов как метод прогнозирования и диагностики в нефтедобыче. – “Техника и технология добычи нефти”, № 2, 2002 – С. 71 – 74.

54. Янтурин А.Ш. Статическое исследование напряженного состояния спиральнодеформированной колонны труб. Глубинное оборудование для бурения и эксплуатации нефтяных и газовых скважин. Вып. 28 – Уфа, 1976 – С. 96 – 100.

55. Лесняк Ю.А. Расчет напряжений в колоннах труб нефтяных скважин. – М.: Недра, 1973 – 102 с.

56. Диагностические возможности моноблочных электронных динамографов «СИДДОС-автомат» // Нефтяное хозяйство. -- 2000. – №7. – С.87 – 88.

57. Электронная переносная система динамометрирования “УРАН-100” (<http://uralniti.narod.ru/>)

58. Программно-аппаратный комплекс исследования и диагностики ШГНУ (ПАК "КДС") (<http://www.neftegazprogress.ru/nauka-dneft.shtml>)

59. Diamond Series Rod Pump Controller (http://www.ter-usa.com/HTML_PRODUCTS/prod-gen.htm)
60. AEPOC. Automation Electronics Pump Off Controller (<http://www.autoelect.com/>)
61. Model 8800 Rod Pump Controller (<http://www.caconline.com>)
62. Локальная система оптимального управления нефтедобывающей скважиной, оснащенной установкой штангового глубинного насоса (УШНГ) (<http://www.uralniti.ru/>)
63. Podio A.L., McCoy J.N., Becker D., Rowlan L, Drake B. Total Well Management II. – SPE 67273 presented at the SPE Production and Operation Symposium held in Oklahoma City, Oklahoma, March 2001
64. Мобильный аппаратно-программный комплекс диагностики скважин "Квантор-3" (<http://www.sprut.ru/quantor-t/prod.htm>)
65. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Автоматический контроль и диагностика скважинных штанговых насосных установок. – М.: Недра, 1988. – 232 с.
66. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Перспективы автоматизации обработки информации при диагностике глубинно-насосного нефтяного оборудования // Изв.вузов: Нефть и газ, 1981. – №9. – С. 88 – 92
67. Методы и средства контроля технического состояния глубиннонасосного оборудования // Алиев Т.М., Надеин В.А., Рыскин Л.М., Тер-Хачатуров А.А. - М., 1981. – 57 с. – (Обз. инф./ВНИИОЭНГ. Нефт. пром. Сер."Автоматиз. и телемех. нефт. пром.")
68. Смотрицкий Ш.М. Некоторые вопросы распознавания динамограмм. – Тез. докл. межвуз. науч. конф.. – М.: МИНХиГП, 1966.
69. Алиев Т.М., Костянян В.Р., Тер-Хачатуров А.А. Об одном подходе к распознаванию неисправностей глубинного насоса по динамограмме, инвариантной к пространственному положению осей // Изв. вузов: Нефть и газ. – 1983. – №8. – С. 60 - 67.

70. Бандура В.В., Євчук О.В., Заміховський Л.М., Шумада В.М. Використання математичного апарату кореляційних функцій для оцінки технічного стану ГНШУ// Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу. – Івано-Франківськ, – 1999. – Вип.36 (т. 6). – С. 184 – 194.

71. Horseshoe Dynamometer Transducer (<http://www.echometer.com/>)

72. Model 1923 Series Loadtrol (<http://www.interface.com>)

73. Оборудование и программное обеспечение для управления и контроля скважин. Каталог фирмы "Barker CAC" Printed in USA, 8800-5M-2193., 1996.

74. CAC Stainless Steel Polished Rod Load Cell (<http://www.eproductionsolutions.com/Solutions/>)

75. Динамограф встраиваемый Микон-802 (<http://www.mikon.ru/>)

76. Пат. 4090405 США, МКИ G01L 001/22. Polished rod load transducer / McKee F. E. – Заявл. 14.04.77; Опубл. 23.05.78

77. Пат. 3965736 США, МКИ E21B 047/00. Clamp-on transducer for well unit / Welton B. S., Westerman G. W. – Заявл. 13.02.74; Опубл. 29.06.76

78. Динамограф-эхолот. Переносной прибор для оперативной диагностики нефтепромыслового оборудования (ДН-9) (<http://www.intekufa.ru/>)

79. Комплекс эхолот/динамограф Микон-101-00 (<http://www.mikon.ru/>)

80. Устройство диагностики скважин «УДС-25ДЭ» (динамограф+эхолот) (<http://v-1336.ru/>)

81. Заміховський Л.М., Васьків О.В., Ровінський В.А., Шумада В.М. Локальна система діагностування штангових глибинно-насосних установок // ДМНТЗ: "Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ". Сер.: Методи і засоби . - Івано-Франківськ, – 2000. – Вип. 37 (т. 8).

82. Заміховський Л.М., Васьків О.В., Ровінський В.А., Шумада В.М. Тензометричний давач для діагностування штангових глибинно-насосних установок // ДМНТЗ: "Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ". Сер.: Техн. кібернет. та електриф. об'єктів паливно-енергетичного комплексу. – Івано-Франківськ, – 2001. – Вип. 37 (т.6). – С. 201 – 208.

83. Заміховський Л.М., Васьків О.В., Ровінський В.А. Вдосконалення тензометричного давача автоматизованої системи діагностування штангових глибинно-насосних установок // НТЖ “Методи і прилади контролю якості”. – Івано-Франківськ, – 2002. – №8. – С. 19 – 21.

84. Локшин Л.И., Пугачевский В.З., Гординский Е.И. Диагностирование эксплуатации глубинных насосов скважин устройствами тензодинамографирования // Нефтяное хозяйство. – 1988. – №3. – С. 44 – 46

85. Lea J.F., Winkler H.W., Nickens H.V. What's new in artificial lift // World Oil, March 1998. Vol.219 No.3

86. Майоров И.К. Спиральный изгиб колонны труб в скважине – „Нефтяное хозяйство”, № 4, 1966.

87. Замиховский Л.М., Хашханов И.Г. Трехмерная модель деформированной колонны насосно-компрессорных штанг с учетом винтовой конфигурации при прямолинейной оси скважины.– „Методы и средства технической диагностики”, Сб. научных статей, Вып. XIX, Йошкар-Ола, 2002 – С. 120-122.

88. Хашханов И.Г. Моделирование процесса деформирования штанговой колонны в скважине с криволинейной осью.– „Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах”, №2, 2002 – С. 193 – 196.

89. Чекурін В.Ф., Олійник А.П. Некоректне завдання відновлення ПДВ криволінійних циліндричних тіл за відомими переміщеннями певної множини точок поверхні - „Крайові завдання термомеханіки” (част. II): Зб. наук. пр. – Київ: Інститут математики НАН України, 1996 – С. 160 – 165.

90. Седов Л.И. Механика сплошных сред. – М. Наука, т.2, 1984–572 с.
91. Хашханов И.Г. Математическое моделирование процесса трёхмерной деформации штанговой колонны в скважине с криволинейной осью. – Матеріали III-ї наук.-техн. конфер. „Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового устаткування”, 3-6 грудня 2002р., Івано-Франківськ, – С. 123 – 125.
92. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина. – М.: Мир, 1988.–352 с.
93. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.; – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: думка, 1988. – 736 с.
94. Хашханов И.Г. Моделирование процесса колебаний ШГНУ в процессе запуска и в установившемся режиме работы. – „Методи та прилади контролю якості”, №10, 2003 – С.97 – 99.
95. Замиховский Л.М., Калявин В.П. Техническая диагностика погружных электроустановок для добычи нефти. – Снятын: Прут Принт, 1999 – 234 с.: ил.
96. Хашханов И.Г., Замиховский Л.М. Математическое моделирование нестационарной деформации ГНШУ.– „Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ” № 38 (т. 38), 2001 – С. 25 – 27.
97. Хайрер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Мир, 1990. – 512 с.
98. Хашханов И.Г. Моделирование напряженного состояния колонны насосно-компрессорных штанг с учетом винтовой конфигурации оси в прямолинейной скважине. – „Методи і прилади контролю якості” № 15, 2005 – С. 8 – 11.
99. Замиховский Л.М, Хашханов И.Г. Моделирование процесса деформации штанговой колонны с использованием уравнений теории упругости в перемещениях с учетом криволинейностей// Наукові вісті

інституту менеджменту і економіки „Галицька академія”. – Івано-Франківськ №2(6), 2004 – с.226 – 230.

100. Крейг Арнуш. BorlandC++: Освой самостоятельно – М.: Бином, 1997.

101. Скляр В.А. Язык С++ и ООП. – Минск.: Вышэйшая школа, 1997.

102. Замиховский Л.М., Евчук О.В., Хашханов И.Г. Исследование влияния спиралевидности штанговой колонны ГНШУ на динамограмму.- Восточ.-европ. журнал передовых технологий. – 2007.-№2. – С.

103. J. Xu, K.Nolen, D.Shipp, A.Cordova, S.Gibbs. Rod pumping deviated wells // www.lufkinautomation.com, 2006

104. Lea J.F., Pattillo P.D, Studenmund W.R. Interpretation of calculated forces on sucker rods // SPE Production & Facilities, February 1995.

105. Ковшов В.Д., Сидоров М.Е., Светлакова С.В. Моделирование динамограммы станка-качалки. Нормальная работа насоса // Нефтегазовое дело. – 2004. – №2. – С. 40 – 43.

106. Євчук О.В. Використання ортогональних перетворень для реалізації методу автоматизованого діагностування ШГНУ // Наук. вісник Івано-Франківського нац. техн. ун-ту нафти і газу. – 2004. – №3(9). – С. 156 – 160.

107. Євчук О.В, Бандура В.В, Замиховський Л.М. Методика виділення інформативних ділянок для аналізу вібраційного процесу в штанговій колоні штангової глибинно-насосної установки // Матеріали 6-ї Міжнар. наук.-пр. конф. “Нафта і газ України-2000”. – Івано-Франківськ,2000. – (т.3). – С. 301 – 307.

108. Замиховский Л.М., Хашханов И.Г. Система диагностирования ГНШУ, работающих в наклонных скважинах.- Вост.-Европ. журнал передовых технологий, 2007. – № 3. – С.

109. Burr-Brown Integrated Circuits Data Book // Mixed Signal Products: Tucson, AZ.: Burr-Brown Corporation, 1996.
110. AD780 –2.5V/3.0V High Precision Reference // www.analog.com
111. 8-bit Microcontroller with 4K/8K Bytes In-System Programmable Flash. AT90S4434, AT90LS4434, AT90S8535, AT90LS8535 // www.atmel.com
112. Муравьев В.М. Справочник мастера по добыче нефти. – М.: Недра, 1975. – 264 с.
113. А.Макаров, А.Б. Ренский, Г.Х. Боркунский, М.И. Этингоф. Тензометрия в машиностроении: Справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975
114. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи).–Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983.–320 с.
115. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 30 с.
116. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978. – 262 с.
117. Калявин В.П., Малышев А.М., Мозгалевский А.В. Организация систем диагностирования судового оборудования. – Л.: Судостроение, 1991.– 168 с.
118. Хашханов И.Г., Иванишин В.П. Определение показателя готовности системы диагностирования глубинно-насосных установок для добычи нефти. – „Методи і прилади контролю якості” № , 2007–с.
119. Заміховський Л.М., Калявін В.П. Проектування систем діагностування: Навчальний посібник.– Івано-Франківськ: Вид-во «Полум'я», – 2003.– 248 с.
120. Заміховський Л.М., Калявін В.П. Основи теорії надійності і технічної діагностики систем: Навчальний посібник. – Івано-Франківськ: Вид – во «Полум'я». – 2004. – 360 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А1

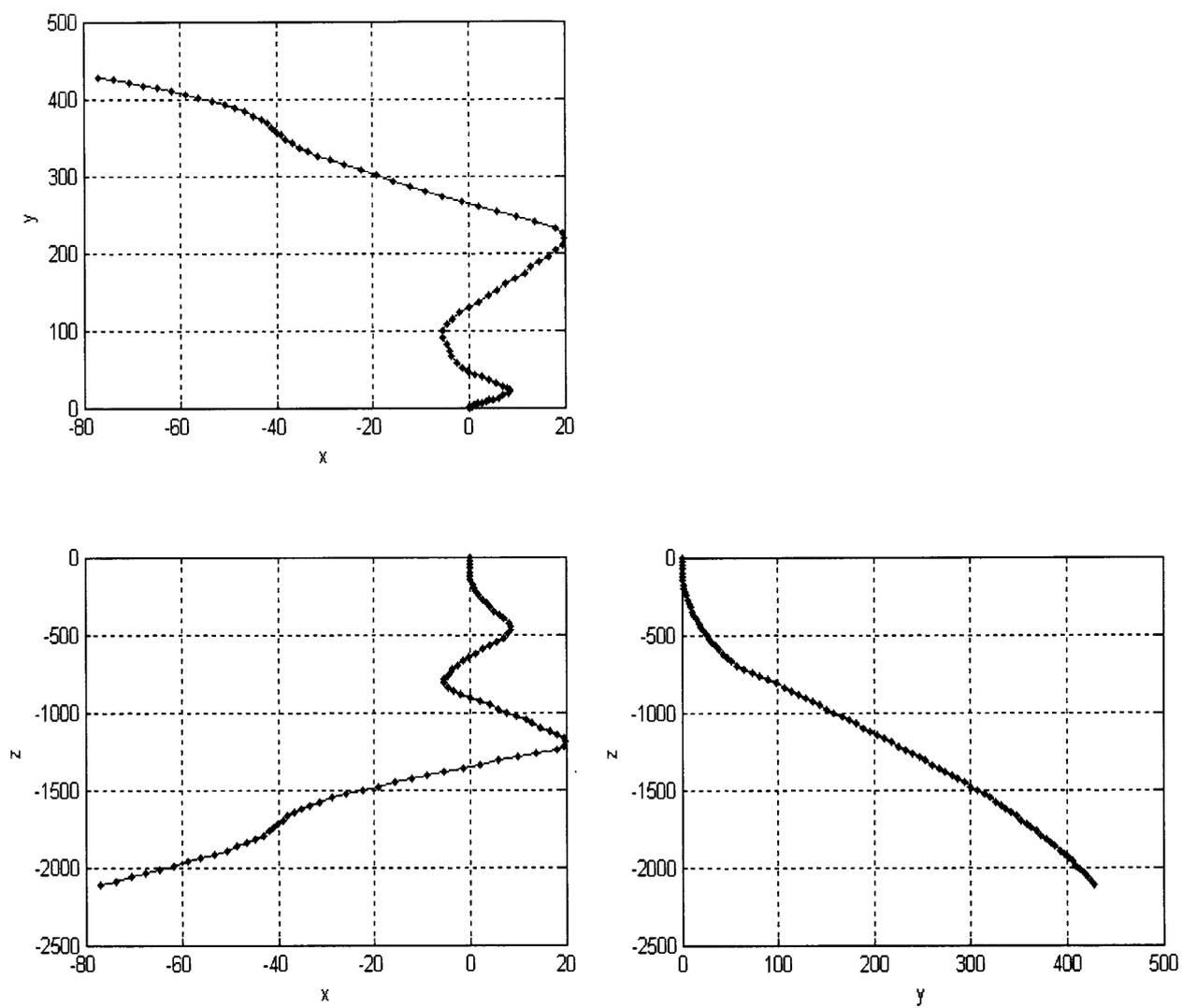
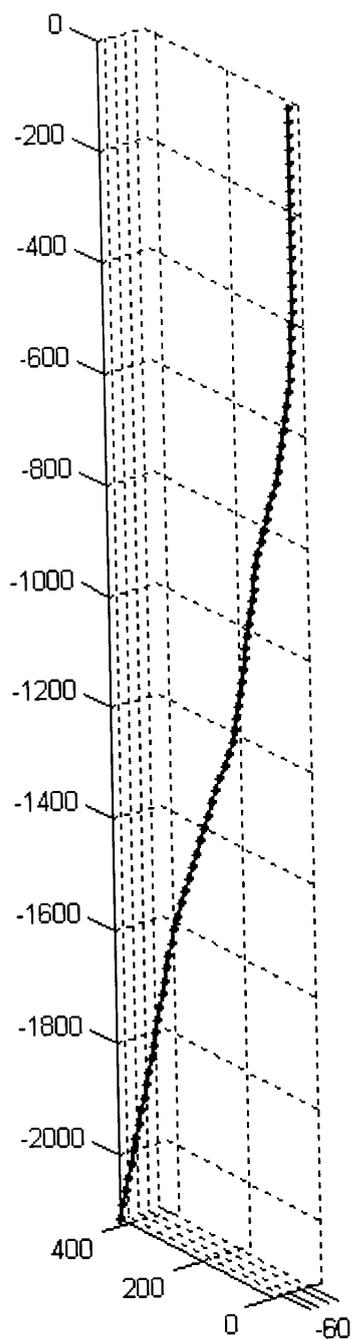
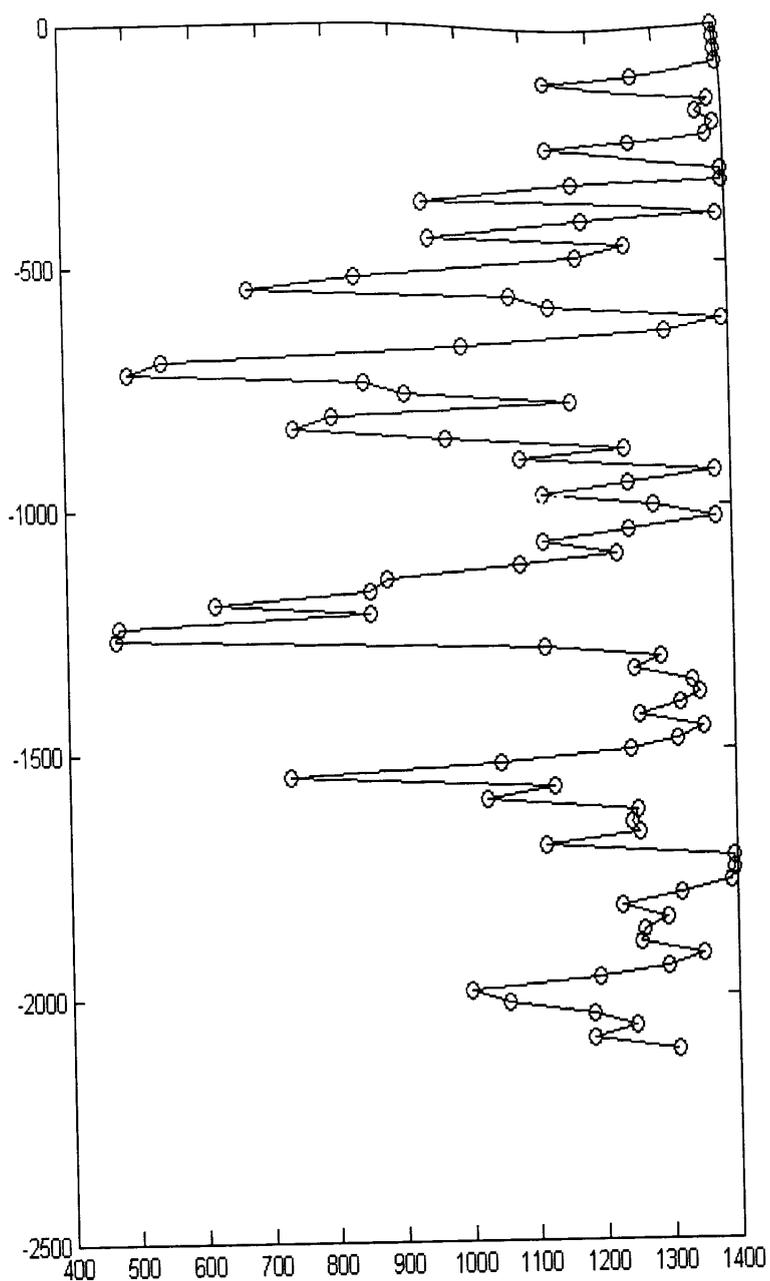


Рис. А.1.1. Проекция профиля скважины Д-66 на координатные плоскости



а)



б)

Рис. А.1.2. Пространственная конфигурация (а) и радиус кривизны (б) скважины Д-66

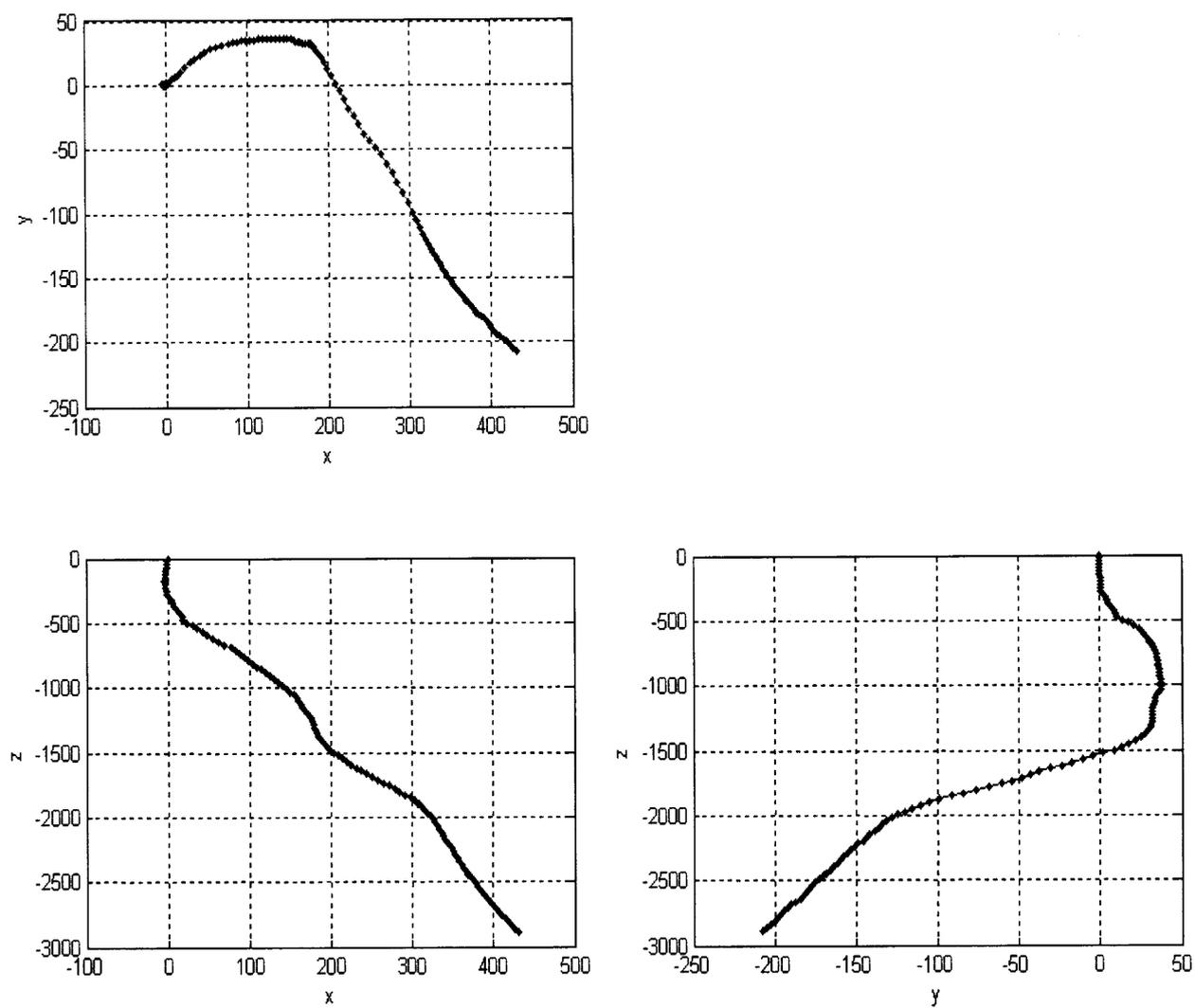
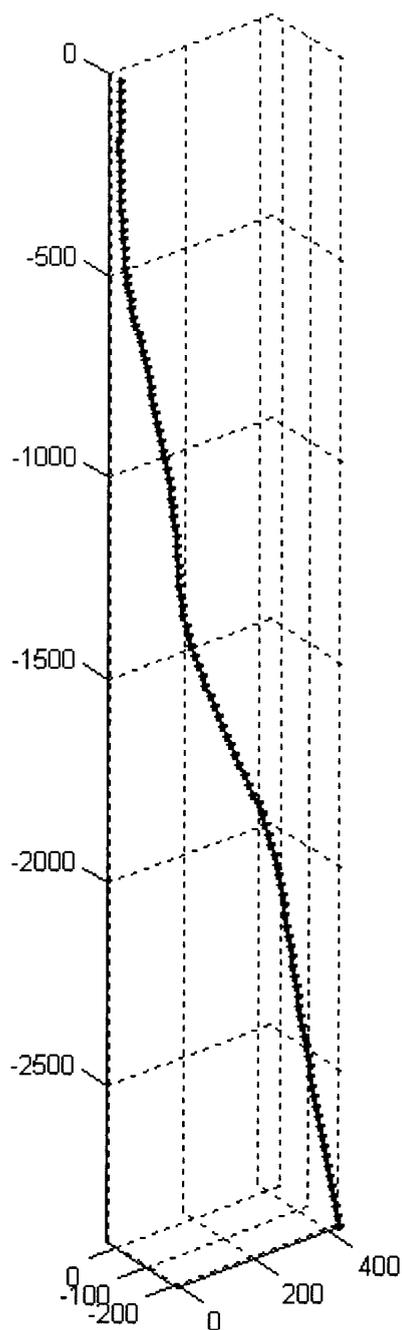
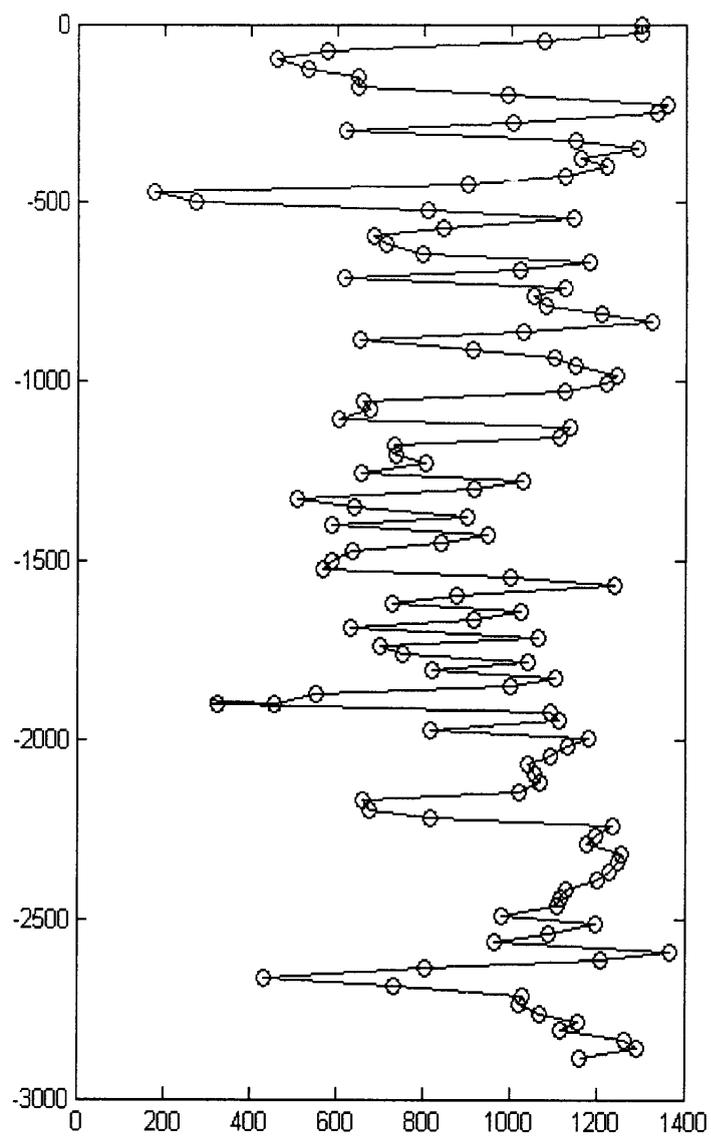


Рис. А.1.3. Проекция профиля скважины Д-67 на координатные плоскости



а)



б)

Рис. А.1.4. Пространственная конфигурация (а) и радиус кривизны (б) скважины Д-67

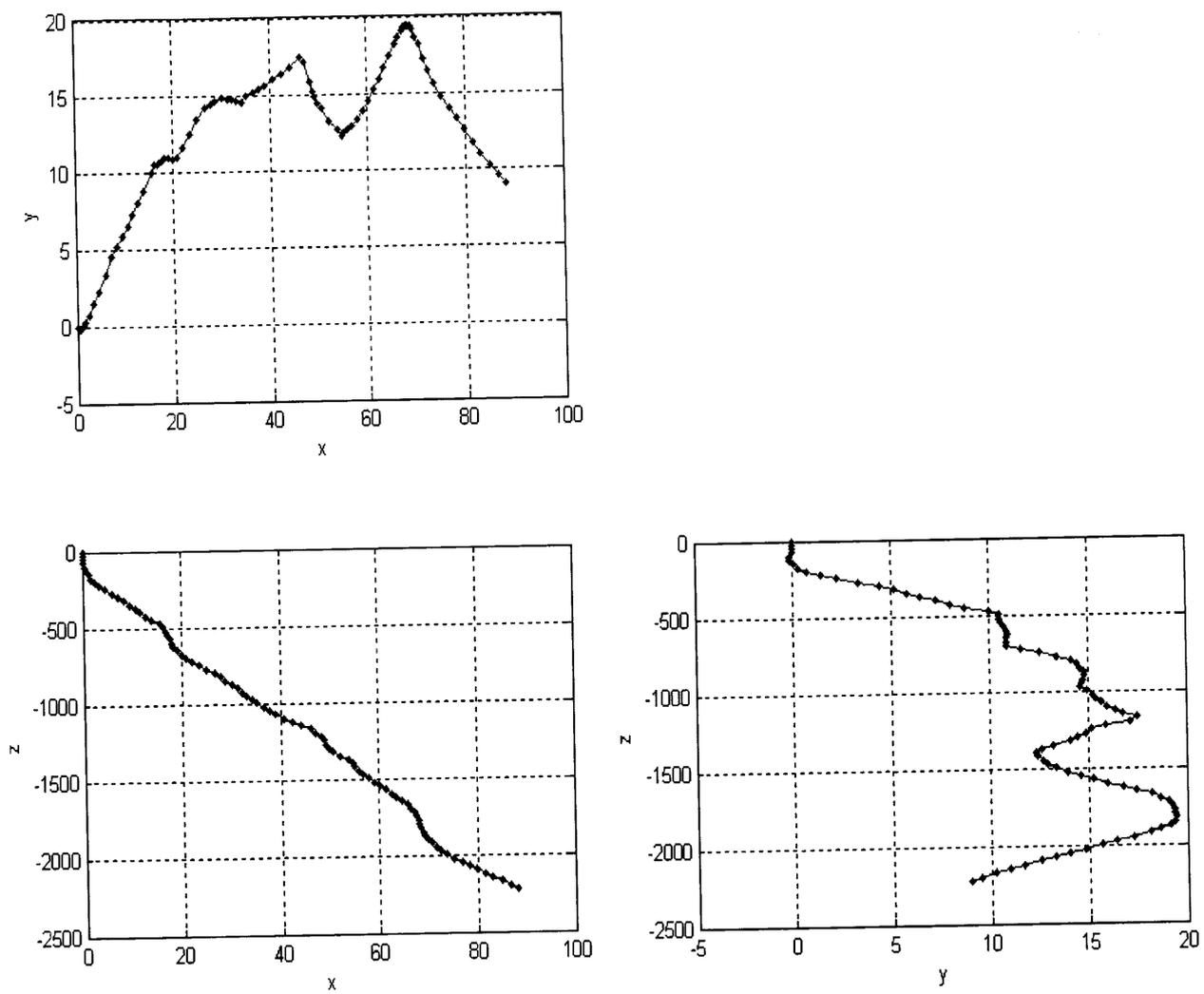


Рис. А.1.5. Проекция профиля скважины П-812 на координатные плоскости

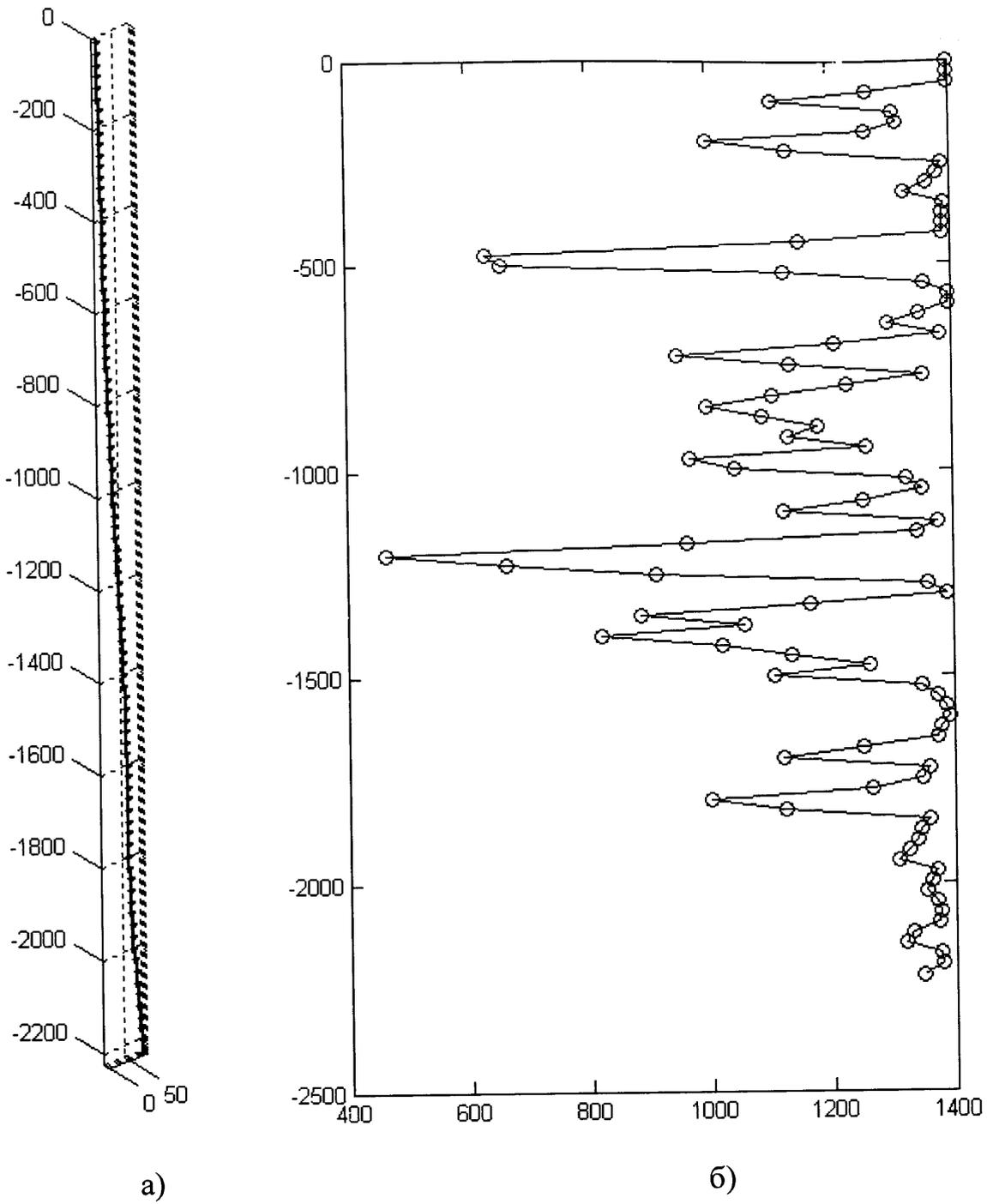


Рис. А.1.6. Пространственная конфигурация (а) и радиус кривизны (б) скважины П-812

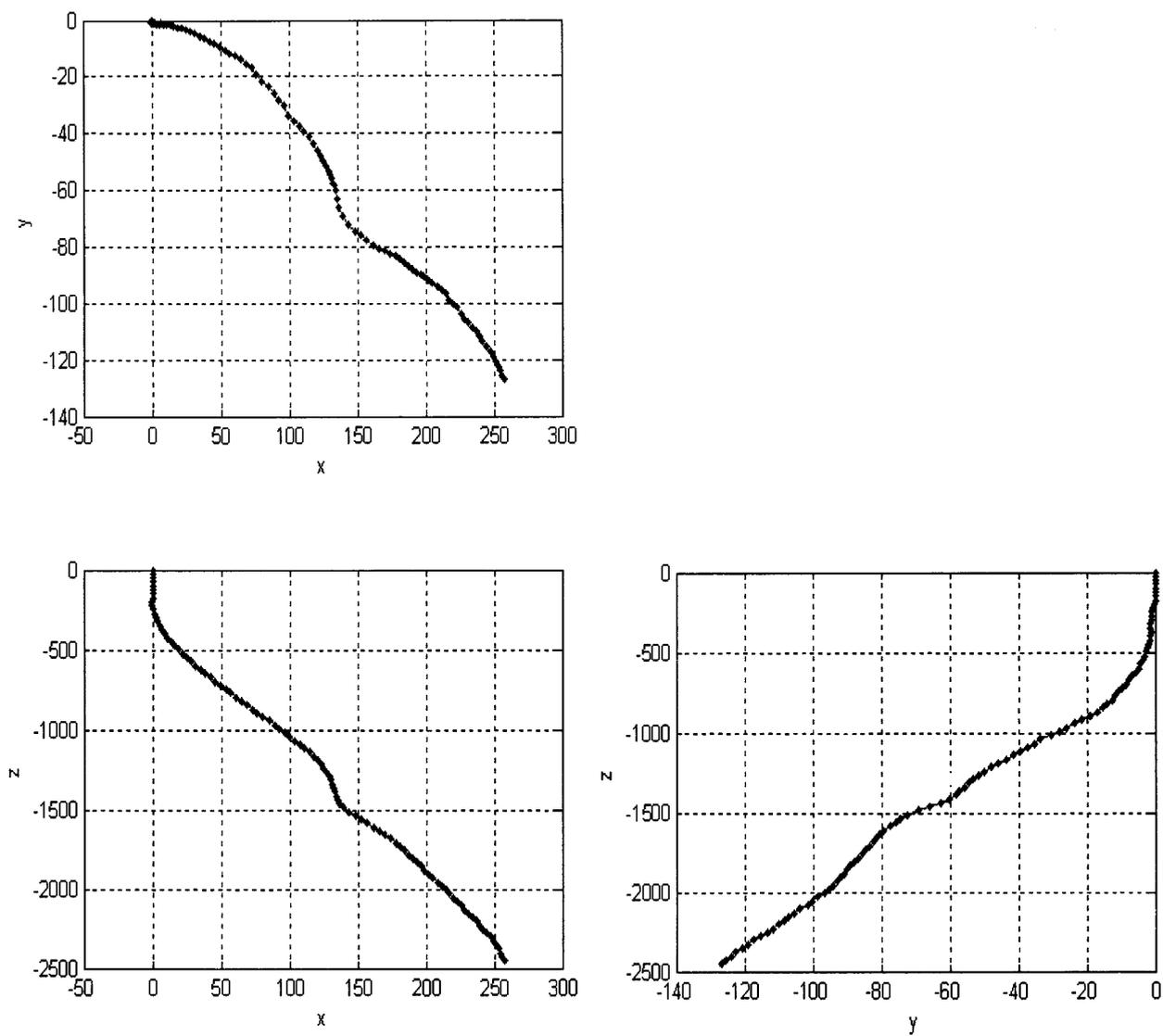


Рис. А.1.7. Проекция профиля скважины Б-708 на координатные плоскости

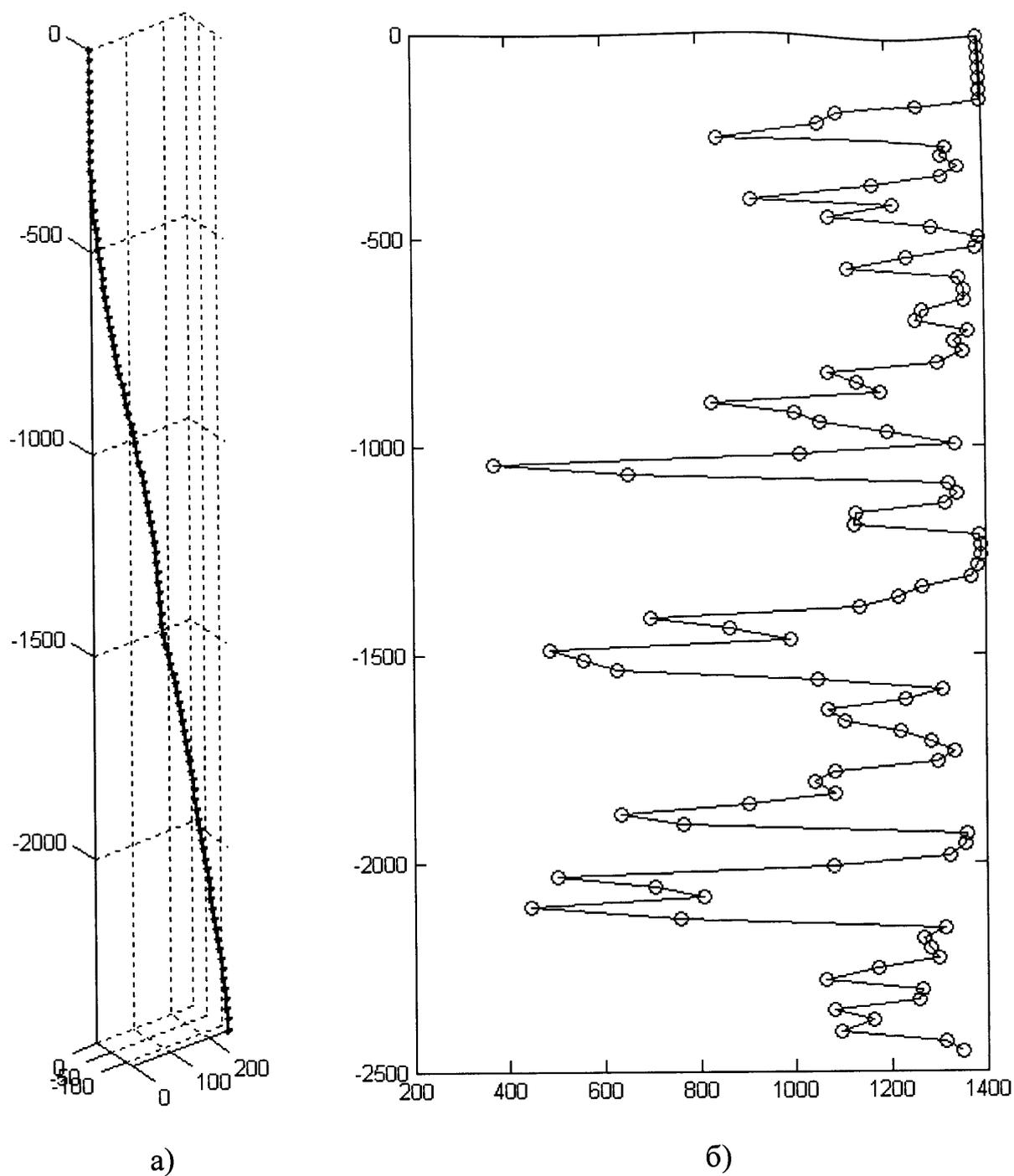


Рис. А.1.8. Пространственная конфигурация (а) и радиус кривизны (б) скважины Б-708

Приложение А2

Основная программа

Файл первой формы Unit1.cpp:

```

//-----
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop

#include "Unit1.h"
#include "Unit2.h"
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"

TForm1 *Form1;
//-----
__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)
    : TForm(Owner)
{
}
//-----
void __fastcall TForm1::FormDeactivate(TObject *Sender)
{
    Timer1->Enabled = false;
}
//-----
void __fastcall TForm1::Timer1Timer(TObject *Sender)
{
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT);

    if(Box1->Checked)RCoor(); //Ввід поточних координатних осей
    (Box7->Checked)? suc = 0:suc = r-r*0.08;
    w = StrToInt("0"+(Edit1->Text));
    h = 1+StrToInt("0"+(Edit2->Text));
    R = Form2->Import(Edit3)/1000;
    r = Form2->Import(Edit4)/1000;
    p = StrToFloat("0"+(Edit5->Text));
    Rozya(); //Виконання функції користувача

    glFlush();
    SwapBuffers(hdc);
}
//-----
void __fastcall TForm1::FormCreate(TObject *Sender)
{
    hdc = GetDC(Handle);
    PIXELFORMATDESCRIPTOR pfd = {
        sizeof(PIXELFORMATDESCRIPTOR),
        1,
        PFD_DRAW_TO_WINDOW | PFD_SUPPORT_OPENGL | PFD_DOUBLEBUFFER,
        PFD_TYPE_RGBA,
        24,
        0,0,0,0,0,0,
        0,0,
        0,0,0,0,0,
        32,
        0,
        0,
        PFD_MAIN_PLANE,
        0,
        0,0,
    };
    SetPixelFormat(hdc, ChoosePixelFormat(hdc, &pfd), &pfd);

    hrc = wglCreateContext(hdc);
    if(hrc == NULL)
        ShowMessage(":-)~ hrc == NULL");
    if(wglMakeCurrent(hdc, hrc) == false)
        ShowMessage("Could not MakeCurrent");

    glEnable(GL_DEPTH_TEST);
    glEnable(GL_CULL_FACE);
}

```

```

    glClearColor(0.0f, 0.0f, 0.0f, 1.0f);
    SetupLighting();
}
//-----
void __fastcall TForm1::SetupLighting()
{
    GLfloat MaterialAmbient[] = {0.5, 0.5, 0.5, 1.0};
    GLfloat MaterialDiffuse[] = {1.0, 1.0, 1.0, 1.0};
    GLfloat MaterialSpecular[] = {1.0, 1.0, 1.0, 1.0};
    GLfloat MaterialShininess[] = {50.0};
    GLfloat AmbientLightPosition[] = {0.5, 1.0, 1.0, 0.0};
    GLfloat LightAmbient[] = {0.5, 0.5, 0.5, 1.0};

    glMaterialfv(GL_FRONT, GL_AMBIENT, MaterialAmbient);
    glMaterialfv(GL_FRONT, GL_DIFFUSE, MaterialDiffuse);
    glMaterialfv(GL_FRONT, GL_SPECULAR, MaterialSpecular);
    glMaterialfv(GL_FRONT, GL_SHININESS, MaterialShininess);
    glLightfv(GL_LIGHT0, GL_POSITION, AmbientLightPosition);
    glLightModelfv(GL_LIGHT_MODEL_AMBIENT, LightAmbient);

    glEnable(GL_LIGHTING);
    glEnable(GL_LIGHT0);
    glEnable(GL_COLOR_MATERIAL);
    glColorMaterial(GL_FRONT, GL_AMBIENT_AND_DIFFUSE);
    glShadeModel(GL_SMOOTH);
}

void __fastcall TForm1::RPix(float x, float y, float z)
{
    glBegin(GL_POINTS);
    glVertex3d(x,y,z);
    glEnd();
}

float __fastcall TForm1::RHeight(float x1, float y1, float z1, float x2, float y2, float z2)
{
    float X = x2 - x1,
          Y = y2 - y1,
          Z = z2 - z1;
    float L = sqrtl(powl(X,2)+powl(Y,2)+powl(Z,2));
    return L;
}

void __fastcall TForm1::RLine(float x1, float y1, float z1, float x2, float y2, float z2, int w)
{
    glLineWidth(w);
    glBegin(GL_LINES);
    glVertex3d(x1,y1,z1);
    glVertex3d(x2,y2,z2);
    glEnd();
}

void __fastcall TForm1::RCoor()
{
    glPushMatrix(); glColor3d(0,1,0);
    gluCylinder(gluNewQuadric(), 0.005, 0.005, 0.5, 50, 1);
    glTranslated(0,0,0.5); glColor3d(1,0,1);
    gluCylinder(gluNewQuadric(), 0.01, 0, 0.1, 50, 1);
    glPopMatrix();

    glPushMatrix(); glColor3d(0,1,0);
    glRotated(-90, 1, 0, 0);
    gluCylinder(gluNewQuadric(), 0.005, 0.005, 0.5, 50, 1);
    glTranslated(0,0,0.5); glColor3d(1,0,1);
    gluCylinder(gluNewQuadric(), 0.01, 0, 0.1, 50, 1);
    glPopMatrix();

    glPushMatrix(); glColor3d(0,1,0);
    glRotated(90, 0, 1, 0);
    gluCylinder(gluNewQuadric(), 0.005, 0.005, 0.5, 50, 1);
    glTranslated(0,0,0.5); glColor3d(1,0,1);
    gluCylinder(gluNewQuadric(), 0.01, 0, 0.1, 50, 1);
    glPopMatrix();
}

void __fastcall TForm1::RCyl(float r, float hc, float x1, float y1, float z1, float x2, float
y2, float z2)
{
    x1+=0.00000001, y1+=0.00000001, z1+=0.00000001;
    float X = x2 - x1,
          Y = y2 - y1,

```

```

        Z = z2 - z1;
float L = sqrtl (powl (X,2)+powl (Y,2)+powl (Z,2));

float f1 = (180/M_PI)*atanl (Z/Y);
float F = (180/M_PI)*asinl (X/L);

glPushMatrix();
glColor3d(1,1,0);
glTranslated(x1,y1,z1);
glRotated(f1,1,0,0);
glRotated(-F,0,0,1);
glRotated(90,1,0,0);
glTranslated(0,0,-L);
if(Box4->Checked){
    Cyl = gluNewQuadric();
    gluCylinder(Cyl,r,r,L,20,1);
};
glRotated(-180,1,0,0);
glColor3d(1,0,0);
if(Box5->Checked){
    DiscK = gluNewQuadric();
    gluDisk(DiscK,suc,r,20,1);
};
glTranslated(0,0,-L);
glRotated(-180,1,0,0);
glColor3d(0,1,0);
if(Box6->Checked){
    DiscKN = gluNewQuadric();
    gluDisk(DiscKN,suc,r,20,1);
};
glPopMatrix();
}

void __fastcall TForm1::FormKeyDown(TObject *Sender, WORD &Key,
    TShiftState Shift)
{
    if(Key == VK_UP)
        glRotatef(-5, 1.0, 0.0, 0.0);
    if(Key == VK_DOWN)
        glRotatef(5, 1.0, 0.0, 0.0);
    if(Key == VK_LEFT)
        glRotatef(-5, 0.0, 1.0, 0.0);
    if(Key == VK_RIGHT)
        glRotatef(5, 0.0, 1.0, 0.0);
    if(Key == VK_ESCAPE)
        Close();
    if(Key == 0x30)
        glViewport(0,0,688,688);
    if(Key == 0x31)
        glViewport(-56,-56,800,800);
    if(Key == 0x32)
        glViewport(-156,-156,1000,1000);
    if(Key == 0x33)
        glViewport(-306,-306,1300,1300);
    if(Key == 0x34)
        glViewport(-456,-456,1600,1600);
    if(Key == 0x35)
        glViewport(-656,-656,2000,2000);
    if(Key == 0x36)
        glViewport(-680,-680,5000,5000);
    if(Key == 0x42)
        glTranslatef(0,-0.01,0);
    if(Key == 0x4c)
        glTranslatef(-0.01,0,0);
    if(Key == 0x52)
        glTranslatef(0.01,0,0);
    if(Key == 0x54)
        glTranslatef(0,0.01,0);
    if(Key == 0x58)
        glTranslatef(0,0,0.01);
    if(Key == 0x5a)
        glTranslatef(0,0,-0.01);
}
//-----
void __fastcall TForm1::FormClick(TObject *Sender)
{
    if(Box1->Visible){ Timer1->Enabled = true;
    Box1->Visible = false;
    Box2->Visible = false;
    Box3->Visible = false;
}

```

```

Box4->Visible      = false;
Box5->Visible      = false;
Box6->Visible      = false;
Box7->Visible      = false;
Button1->Visible   = false;
Button2->Visible   = false;
Button3->Visible   = false;
Edit1->Visible     = false;
Edit2->Visible     = false;
Edit3->Visible     = false;
Edit4->Visible     = false;
Edit5->Visible     = false;
Text1->Visible     = false;
Text2->Visible     = false;
Text3->Visible     = false;
Text4->Visible     = false;
Text5->Visible     = false;

}
else
{ Timer1->Enabled = false;
Box1->Visible      = true;
Box2->Visible      = true;
Box3->Visible      = true;
Box4->Visible      = true;
Box5->Visible      = true;
Box6->Visible      = true;
Box7->Visible      = true;
Button1->Visible   = true;
Button2->Visible   = true;
Button3->Visible   = true;
Edit1->Visible     = true;
Edit2->Visible     = true;
Edit3->Visible     = true;
Edit4->Visible     = true;
Edit5->Visible     = true;
Text1->Visible     = true;
Text2->Visible     = true;
Text3->Visible     = true;
Text4->Visible     = true;
Text5->Visible     = true;

}
}
//-----
void __fastcall TForm1::Rozya()
{
int k = 1; float sumh=0,sumw=0;
float *ArreyX = new float[h+1];
float *ArreyY = new float[h+1];
float *ArreyZ = new float[h+1];
float *Height = new float[h+1];
float *Width = new float[h+1];

for(int i=0;i<=h;i++) //формування масиву
{
ArreyX[i] = cosl(((float)i/h)*p*2*M_PI);
ArreyY[i] = i;
ArreyZ[i] = sinl(((float)i/h)*p*2*M_PI);
}

for(int i=0;i<=h-1;i+=k)
{
Height[i] =
RHeight(R*ArreyX[i],ArreyY[i]/h,R*ArreyZ[i],R*ArreyX[i+k],ArreyY[i+k]/h,R*ArreyZ[i+k]);
sumh += Height[i];
Width[i] = RHeight(ArreyX[i],ArreyY[i],ArreyZ[i],ArreyX[i+k],ArreyY[i+k],ArreyZ[i+k]);
sumw += abs(ArreyY[i+1]-abs(ArreyY[i]));
glPushMatrix(); glColor3d(1,0,0);
glTranslated(0,-0.5,0);
if(Box2->Checked)RPix(R*ArreyX[i],ArreyY[i]/h,R*ArreyZ[i]);
if(Box3-
>Checked)RLine(R*ArreyX[i],ArreyY[i]/h,R*ArreyZ[i],R*ArreyX[i+k],ArreyY[i+k]/h,R*ArreyZ[i+k],w);
RCyl(r,0.01,R*ArreyX[i],ArreyY[i]/h,R*ArreyZ[i],R*ArreyX[i+k],ArreyY[i+k]/h,R*ArreyZ[i+k]);
glPopMatrix();
}

Text6->Caption = "K = "+FloatToStr(ceil(sumh*1000000)/1000000);
Text7->Caption = "L = "+FloatToStr(ceil(sumw*1000000)/1000000)*Form2->z;

```

```

delete[]ArreyX;
delete[]ArreyY;
delete[]ArreyZ;
delete[]Height;
delete[]Width;
}

void __fastcall TForm1::FormDestroy(TObject *Sender)
{
    gluDeleteQuadric(Cyl);
    gluDeleteQuadric(DiscK);
    gluDeleteQuadric(DiscK);
    wglMakeCurrent(NULL, NULL);
    wglDeleteContext(hrc);
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button1Click(TObject *Sender)
{
    glMatrixMode(GL_MODELVIEW);
    glLoadIdentity();
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button2Click(TObject *Sender)
{
    Close();
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button3Click(TObject *Sender)
{
    if(Form2->Visible){Form2->Visible = false;}
    else Form2->Visible = true;
}

```

Файл заглавия Unit1.h:

```

//-----

#ifndef Unit1H
#define Unit1H
//-----
#include <Classes.hpp>
#include <Controls.hpp>
#include <StdCtrls.hpp>
#include <Forms.hpp>
#include <ExtCtrls.hpp>
#include <gl\gl.h>
#include <gl\glu.h>
#include <math.h>

//-----
class TForm1 : public TForm
{
__published:      // IDE-managed Components
    TCheckBox *Box1;
    TEdit *Edit1;
    TStaticText *Text1;
    TCheckBox *Box2;
    TCheckBox *Box3;
    TCheckBox *Box4;
    TCheckBox *Box5;
    TCheckBox *Box6;
    TButton *Button1;
    TButton *Button2;
    TCheckBox *Box7;
    TStaticText *Text2;
    TEdit *Edit2;
    TEdit *Edit3;
    TStaticText *Text4;
    TEdit *Edit4;
    TStaticText *Text3;
    TStaticText *Text5;
    TEdit *Edit5;
    TStaticText *Text6;
    TStaticText *Text7;

```

```

TTimer *Timer1;
TButton *Button3;
void __fastcall FormCreate(TObject *Sender);
void __fastcall FormKeyDown(TObject *Sender, WORD &Key,
    TShiftState Shift);
void __fastcall FormClick(TObject *Sender);
void __fastcall FormDestroy(TObject *Sender);
void __fastcall Button1Click(TObject *Sender);
void __fastcall Button2Click(TObject *Sender);
void __fastcall Timer1Timer(TObject *Sender);
void __fastcall Button3Click(TObject *Sender);
void __fastcall FormDeactivate(TObject *Sender);
private: // User declarations
    HDC hdc;
    HGLRC hrc;
    GLsizei size;

public: // User declarations
    __fastcall TForm1(TComponent* Owner);

    void __fastcall SetupLighting();
    void __fastcall Rozya();
    void __fastcall RPix(float x, float y, float z);
    void __fastcall RLine(float x1, float y1, float z1, float x2, float y2, float z2, int w);
    void __fastcall RCoor();
    void __fastcall RCyl(float r, float hc, float x1, float y1, float z1, float x2, float y2, float
z2);
    float __fastcall RHeight(float x1, float y1, float z1, float x2, float y2, float z2);
        GLUquadricObj *Cyl,*DisckN,*DisckV;
        int h,w,p;
        float suc,R,r;

};
//-----
extern PACKAGE TForm1 *Form1;
//-----
#endif

```

Файл второй формы Unit2.cpp:

```

//-----
#include <vcl.h>
#include <math.h>
#pragma hdrstop
#include "Unit3.h"
#include "Unit2.h"
#include "Unit1.h"
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TForm2 *Form2;
const float fi = 2*M_PI,
    sigma = 0.3, //коэффициент Пуассона
    E = 210*pow(10,9); //модуль Юнга

//-----
__fastcall TForm2::TForm2(TComponent* Owner)
    : TForm(Owner)
{
}
//-----

float __fastcall TForm2::Import(TEdit *EDIT)
{
    AnsiString an = "0"+EDIT->Text;
    for(int i=1;i<an.Length();i++)
        {
            if(an[i]=='.') {an[i]=',';break;}
        }
    return StrToFloat(an);
}
float __fastcall TForm2::a(float k, float z)
{
    return fi*k/z;
}
//-----

```

```

float __fastcall TForm2::e11(float k, float z)
{
    return 0;
}
float __fastcall TForm2::e12(float k, float z)
{
    return 0;
}
float __fastcall TForm2::e22(float k, float z)
{
    return 0;
}
float __fastcall TForm2::e13(float k, float z)
{
    return 0;
}
float __fastcall TForm2::e23(float k, float z)
{
    return 0.5*(r*R*a(k,z)*sinl(a(k,z)*z)*sinl(fi)+r*R*a(k,z)*cosl(a(k,z)*z)*cosl(fi));;
}
float __fastcall TForm2::e33(float k, float z)
{
    return
0.5*(pow(R,2)*pow(a(k,z),2)*pow(sin(a(k,z)*z),2)+pow(R,2)*pow(a(k,z),2)*pow(cosl(a(k,z)*z),2));
}
float __fastcall TForm2::s22(float k, float z)
{
    return lambda*I*g22+2*mju*ceil(e22(k,z)*pow(10,9))/pow(10,9);
}

//-----
void __fastcall TForm2::Button1Click(TObject *Sender)
{
    z = Import(Edit1);
    R = Import(Edit2);
    r = Import(Edit3);
    n = Import(Edit4);
    g11=1;g12=0;g13=0;g22=1/pow(r,2);g23=0;g33=1;
    s11=0;s12=0;s13=0;s23=0;s33=0;

    lambda = sigma*E/((1-2*sigma)*(1+sigma));
    Label6->Caption = "L = "+FloatToStr(lambda);
    mju = E/(2*(1+sigma));
    Label5->Caption = "M = "+FloatToStr(mju);
    I =
0.5*(pow(R,2)*pow(a(n,z),2)*pow(sin(a(n,z)*z),2)+pow(R,2)*pow(a(n,z),2)*pow(cosl(a(n,z)*z),2));
    Label9->Caption = "I = " + FloatToStr(ceil(I*pow(10,12))/pow(10,14));
    s11 = lambda*I*g11+2*mju*ceil(e11(n,z)*pow(10,9))/pow(10,9);
    s12 = lambda*I*g12+2*mju*ceil(e12(n,z)*pow(10,9))/pow(10,9);
    s13 = lambda*I*g13+2*mju*ceil(e13(n,z)*pow(10,9))/pow(10,9);
    s23 = lambda*I*g23+2*mju*ceil(e23(n,z)*pow(10,9))/pow(10,9);
    s33 = lambda*I*g33+2*mju*ceil(e33(n,z)*pow(10,9))/pow(10,9);
    Label8->Caption = "sigma_11 = "+FloatToStr(ceil(s11*pow(10,3))/pow(10,9));
    Label7->Caption = "sigma_12 = "+FloatToStr(ceil(s12*pow(10,3))/pow(10,9));
    Label10->Caption = "sigma_13 = "+FloatToStr(ceil(s13*pow(10,3))/pow(10,9));
    Label11->Caption = "sigma_22 = "+FloatToStr(ceil(s22(n,z)*pow(10,3))/pow(10,9));
    Label12->Caption = "sigma_23 = "+FloatToStr(ceil(s23*pow(10,3))/pow(10,9));
    Label13->Caption = "sigma_33 = "+FloatToStr(ceil(s33*pow(10,3))/pow(10,9));
    Label14->Caption = "g_11 = "+FloatToStr(ceil(e11(n,z)*pow(10,9))/pow(10,9));
    Label15->Caption = "g_12 = "+FloatToStr(ceil(e12(n,z)*pow(10,9))/pow(10,9));
    Label16->Caption = "g_13 = "+FloatToStr(ceil(e13(n,z)*pow(10,9))/pow(10,9));
    Label17->Caption = "g_22 = "+FloatToStr(ceil(e22(n,z)*pow(10,9))/pow(10,9));
    Label18->Caption = "g_23 = "+FloatToStr(ceil(e23(n,z)*pow(10,9))/pow(10,9));
    Label19->Caption = "g_33 = "+FloatToStr(ceil(e33(n,z)*pow(10,9))/pow(10,9));
}

//-----
void __fastcall TForm2::Button2Click(TObject *Sender)
{
    Form2->Close(); Form3->Close();
}

//-----
void __fastcall TForm2::Button3Click(TObject *Sender)
{
    if(Form3->Visible)
        {Form3->Visible = false;}
    else Form3->Visible = true;
}

//-----

```

Файл заглавия Unit2.h

```

//-----
#ifndef Unit2H
#define Unit2H
//-----
#include <Classes.hpp>
#include <Controls.hpp>
#include <StdCtrls.hpp>
#include <Forms.hpp>
#include <ExtCtrls.hpp>
#include <jpeg.hpp>
#include <Graphics.hpp>
#include <ImgList.hpp>
#include <ComCtrls.hpp>
//-----
class TForm2 : public TForm
{
__published:      // IDE-managed Components
    TGroupBox *GroupBox1;
    TLabel *Label1;
    TEdit *Edit1;
    TEdit *Edit2;
    TEdit *Edit3;
    TEdit *Edit4;
    TLabel *Label2;
    TLabel *Label3;
    TLabel *Label4;
    TButton *Button1;
    TGroupBox *GroupBox2;
    TLabel *Label5;
    TLabel *Label6;
    TGroupBox *GroupBox3;
    TLabel *Label9;
    TGroupBox *GroupBox4;
    TLabel *Label7;
    TLabel *Label8;
    TLabel *Label10;
    TLabel *Label11;
    TLabel *Label12;
    TLabel *Label13;
    TButton *Button2;
    TGroupBox *GroupBox5;
    TLabel *Label14;
    TLabel *Label15;
    TLabel *Label16;
    TLabel *Label17;
    TLabel *Label18;
    TLabel *Label19;
    TButton *Button3;
    TEdit *Edit5;
    TEdit *Edit6;
    void __fastcall Button1Click(TObject *Sender);
    float __fastcall Import(TEdit *EDIT);
    void __fastcall Button2Click(TObject *Sender);
    void __fastcall Button3Click(TObject *Sender);
private:      // User declarations
public:      // User declarations
    __fastcall TForm2(TComponent* Owner);
    float __fastcall a(float k, float z);
    float __fastcall e11(float k, float z);
    float __fastcall e12(float k, float z);
    float __fastcall e22(float k, float z);
    float __fastcall e13(float k, float z);
    float __fastcall e23(float k, float z);
    float __fastcall e33(float k, float z);
    float __fastcall s22(float k, float z);
    float z,R,r,n,g11,g12,g13,g22,g23,g33,s11,s12,s13,s23,s33;
    double lambda, mju, I;
};
//-----
extern PACKAGE TForm2 *Form2;
//-----
#endif

```

Файл третьей формы Unit3.cpp

```

//-----
#include <vcl.h>

```

```

#pragma hdrstop

#include "Unit3.h"
#include "Unit2.h"
#include "math.h"
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TForm3 *Form3;
//-----
__fastcall TForm3::TForm3(TComponent* Owner)
    : TForm(Owner)
{
}
//-----
float __fastcall TForm3::S22(float k, float z)
{
    A = 2*M_PI*k/z;
    R = Form2->R;
    r = Form2->r;
    I = 121153.858850*0.5*(pow(R,2)*pow(A,2)*pow(sinl(A*z),2)+
        pow(R,2)*pow(A,2)*pow(cosl(A*z),2));
    return I*(1/pow(r,2));
}

void __fastcall TForm3::Chart1Click(TObject *Sender)
{
    Series1->Clear(); Series2->Clear(); Series3->Clear();
    bool Z2=false, Z3=false; float z2=0, z3=0;
    if(Form2->Edit5->Text != ""){z2 = Form2->Import(Form2->Edit5); Z2 = true;};
    if(Form2->Edit6->Text != ""){z3 = Form2->Import(Form2->Edit6); Z3 = true;};
    Chart1->Title->Text->Text = "Залежність максимального напруження від кількості витків";
    if(Z2|Z3){Chart1->Title->Text->Text = "Порівняння для різної висоти свердловин";};
    float n=0;
    for(int i=0;i<100;i++)
    {
        n = n+Form2->n/100;
        if(Z2){Series2->AddXY(i, S22(n, z2), ceil((n-0.1)*10)/10, clRed);};
        if(Z3){Series3->AddXY(i, S22(n, z3), ceil((n-0.1)*10)/10, clGreen);};
        Series1->AddXY(i, S22(n, Form2->z), ceil((n-0.1)*10)/10, clBlue);
    }
}
//-----

Файл заглавия Unit3.h
//-----

#ifndef Unit3H
#define Unit3H
//-----
#include <Classes.hpp>
#include <Controls.hpp>
#include <StdCtrls.hpp>
#include <Forms.hpp>
#include <Chart.hpp>
#include <ExtCtrls.hpp>
#include <Series.hpp>
#include <TeEngine.hpp>
#include <TeeProcs.hpp>
//-----
class TForm3 : public TForm
{
__published: // IDE-managed Components
    TChart *Chart1;
    TLineSeries *Series1;
    TLineSeries *Series2;
    TLineSeries *Series3;
    void __fastcall Chart1Click(TObject *Sender);
private: // User declarations
public: // User declarations
    __fastcall TForm3(TComponent* Owner);
    float __fastcall S22(float k, float z);
    float A,R,r,I;
};
//-----
extern PACKAGE TForm3 *Form3;
//-----
#endif

```

Приложение Б1

Текст программы для микроконтроллера AT90S8535

```

/*****
Project : electronic dynamograph
Version : 1/3/45
Date   : 21.10.2006
Author : Hashanov
Company : IFNTUOG

Chip type      : AT90S8535
Clock frequency : 9,600000 MHz
Memory model   : Small
External SRAM size : 0
Data Stack size  : 128
*****/

#include <90s8535.h>
#include <spi.h>
#define SCLK PORTB.7           // тактування даних АЦП
#define DIN  PINB.6           // дані АЦП
#define ADCSTOP GIMSK=GIMSK&0xBF
#define ADCSTART GIMSK=GIMSK|0x40
#define NAV 64
#define LASTk 66
#define NSHIFT 6
#define NREAD 1024

unsigned int i,j,k=0,devices,temp;

unsigned long int res[NAV];
unsigned long int s;
register char mode,start;
char *pc;
// 1 Wire Bus functions
#asm
.equ __w1_port=0x15
.equ __w1_bit=1
#endasm
#include <1wire.h>

// DS1820 Temperature Sensor functions
#include <ds1820.h>

#define MAX_DEVICES 1

/* DS1820/DS18S20 devices ROM code storage area,
   9 bytes are used for each device
   but only the first 8 bytes contain the ROM code

```

```

and CRC */

unsigned char rom_codes[MAX_DEVICES,9];

// External Interrupt A[PI] service routine
interrupt [EXT_INT0] void ext_int0_isr(void)
{
*(pc+2)=spi(0);
*(pc+1)=spi(0);
*pc=spi(0); pc+=4;
  k++;
if(k==LASTk)
  {ADCSTOP; // Disable INT0+ADC INTERRUPT
  for(i=0;i<LASTk;i++)res[i]>>=4;
  }
  //else ADCSTART;
}

// External Interrupt 1 (Start sensors) service routine
interrupt [EXT_INT1] void ext_int1_isr(void)
{
start++;

}

// Standard Input/Output functions
#include <stdio.h>
// SPI functions
#include <spi.h>// Declare your global variables here

void main(void)
{
// Input/Output Ports initialization
// Port A initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T
PORTA=0x00;
DDRA=0x00;

// Port B initialization
// Func7=Out Func6=In Func5=Out Func4=Out Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=0 State6=T State5=0 State4=0 State3=T State2=T State1=T State0=T
PORTB=0x00;
DDRB=0xB0;

// Port C initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T
PORTC=0x00;
DDRC=0x00;

```

```
// Port D initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=Out Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=0 State0=T
PORTD=0x00;
DDRD=0x02;

// Timer/Counter 0 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 0 Stopped
TCCR0=0x00;
TCNT0=0x00;

// Timer/Counter 1 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 1 Stopped
// Mode: Normal top=FFFFh
// OC1A output: Discon.
// OC1B output: Discon.
// Noise Canceler: Off
// Input Capture on Falling Edge
TCCR1A=0x00;
TCCR1B=0x00;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;

// Timer/Counter 2 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 2 Stopped
// Mode: Normal top=FFh
// OC2 output: Disconnected
ASSR=0x00;
TCCR2=0x00;
TCNT2=0x00;
OCR2=0x00;

// External Interrupt(s) initialization
// INT0: On
// INT0 Mode: Falling Edge
// INT1: On
// INT1 Mode: Falling Edge
GIMSK=0xC0;
MCUCR=0x0A;
GIFR=0xC0;

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x00;

// UART initialization
```

```

// Communication Parameters: 8 Data, 1 Stop, No Parity
// UART Receiver: On
// UART Transmitter: On
// UART Baud rate: 19200
UCR=0x18;
UBRR=0x1E;

// Analog Comparator initialization
// Analog Comparator: Off
// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1: Off
ACSR=0x80;

// SPI initialization
// SPI Type: Master
// SPI Clock Rate: 2400,000 kHz
// SPI Clock Phase: Cycle Half
// SPI Clock Polarity: Low
// SPI Data Order: MSB First
SPCR=0x50;
ADCSTOP;

// 1 Wire Bus initialization
w1_init();

// Global enable interrupts
#asm("sei")

/* detect how many DS1820/DS18S20 devices
   are connected to the bus and
   store their ROM codes in the rom_codes array */

devices=w1_search(0xf0,rom_codes);
start=1;
while (1)
{
// Place your code here
mode=getchar();

switch (mode)
{

case 0x00: printf("RS232 Ok! "); break;
case 0x01: { k=0; pc=(char*)res; ADCSTART;
} break;

case 0x02: {if (k==LASTk)
{s=0;
for (i=2;i<LASTk;i++) s=s+res[i];
s=s>>NSHIFT;
printf("av=%lu ",s);
}
}
}

```

```

    }
    break;
case 0x03: {if (k==LASTk)
    {
        for (i=2;i<LASTk;i++)
        {
            printf("%lu ",res[i]);
        }
    }
    }
    break;
case 0x04: {
    for (j=0;j<NREAD;j++)
    { k=0; pc=(char*)res; ADCSTART;
      while (k<LASTk);
        s=0;
        for (i=2;i<LASTk;i++) s=s+res[i];
        s=s>>NSHIFT;
        printf("%lu\n",s);
    }// for
    }
    break;
case 0x05:{
    temp=ds1820_temperature_10(&rom_codes[i,0]); // measurement temperature
    printf("%lu\n",temp);
    }
    break;
case 0x06:{
    // measurement number cycles
    printf("%lu\n",start);
    } break;

} }

}

```

Приложение Б2

Текст программы динамометрирования ГНШУ

```

unit w_main;
// 70 msec is 70,1 msec
{
  var Save_Cursor: TCursor;
  Save_Cursor := Screen.Cursor;
  Screen.Cursor := crHourglass;
  Screen.Cursor := Save_Cursor;
}
interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  Menus, StdCtrls, ComCtrls, ToolWin, ExtCtrls, db, math, Buttons, TeeProcs,
  TeEngine, Chart, mmsystem, w_lpt, Series, ExtDlgs, w_dat, jpeg, Mask, Gauges,
  Spin, w_cal, w_dinSB;

Type TFrequency = array [0..5] of Longint;
  Tfilext = array [0..7] of string;
  Pchart = ^TChart;
  Pseries = ^TFastLineSeries;

const FILEXT: Tfilext = ('.din', '.s');

type
  TForm1 = class(TForm)
    MainMenu1: TMainMenu;
    Fil: TMenuItem;
    View: TMenuItem;
    Wells: TMenuItem;
    StatusBar1: TStatusBar;
    PanelTime: TPanel;
    EditTime: TEdit;
    EditNperi: TEdit;
    EditNum: TEdit;
    Timer1: TTimer;
    TimerDyn: TTimer;
    AOpen: TMenuItem;
    ASaveData: TMenuItem;
    SavePicture: TMenuItem;
    SaveDialog1: TSaveDialog;
    SavePictureDialog1: TSavePictureDialog;
    OpenDialog1: TOpenDialog;
    Print: TMenuItem;
    LabelT: TLabel;
    Label15: TLabel;
  end;

```

LabelN: TLabel;
Label17: TLabel;
UpDown1: TUpDown;
Save: TMenuItem;
N2: TMenuItem;
NAbout1: TMenuItem;
SynWay: TCheckBox;
ComboBox1: TComboBox;
Label11: TLabel;
SpeedButton2: TSpeedButton;
SpeedButton1: TSpeedButton;
SpeedButton4: TSpeedButton;
SpeedButton3: TSpeedButton;
EditFile: TEdit;
LabF: TLabel;
LabD: TLabel;
EditDate: TEdit;
Label9: TLabel;
EditTi: TEdit;
MaskEdit1: TMaskEdit;
HideTest: TSpeedButton;
Way: TCheckBox;
TestSensPos: TSpeedButton;
Start: TSpeedButton;
Exit_: TMenuItem;
Gauge1: TGauge;
Process: TMenuItem;
StartAction: TMenuItem;
Wevel5: TBevel;
Wevel8: TBevel;
MenuStop: TMenuItem;
AlwaysInt: TCheckBox;
PageControl1: TPageControl;
TabDyn: TTabSheet;
Panel3: TPanel;
Label8: TLabel;
GenWay: TSpeedButton;
Label10: TLabel;
EditKn: TEdit;
EditKp: TEdit;
EditVS: TEdit;
EditVR: TEdit;
EditMaxP: TEdit;
RadioDinTen: TRadioGroup;
EditT: TEdit;
EditSPM: TEdit;
EditTdel: TEdit;
NumStroke: TComboBox;
ChStroke: TUpDown;
Avi: TCheckBox;
Enave: TEdit;
EditFase: TEdit;

```

Panel8: TPanel;
Smooth: TCheckBox;
GrafNL: TCheckBox;
GrafVS: TCheckBox;
GrafVR: TCheckBox;
Memo1: TMemo;
SenDin: TRadioGroup;
UO: TRadioGroup;
ChartDyn: TChart;
SeriesVS: TLineSeries;
SeriesVR: TLineSeries;
SeriesTen: TFastLineSeries;
SeriesUp: TFastLineSeries;
SeriesDown: TFastLineSeries;
SeriesWay: TFastLineSeries;
SeriesWayTeor: TFastLineSeries;
SeriesNL: TFastLineSeries;
procedure ExitItClick(Sender: TObject);
procedure WellsClick(Sender: TObject);
procedure ComboBox1Change(Sender: TObject);
procedure AMessClick(Sender: TObject);
procedure EditTimeChange(Sender: TObject);
procedure AlwaysIntClick(Sender: TObject);
procedure RefreshEdit(Sender: TObject);
procedure EditNperiChange(Sender: TObject);
procedure EditTimeKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
procedure EditNperiKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
procedure UpDown1ChangingEx(Sender: TObject; var AllowChange: Boolean;
  NewValue: Smallint; Direction: TUpDownDirection);
procedure BStartClick(Sender: TObject);
procedure BTimer1Timer(Sender: TObject);
procedure BStopClick(Sender: TObject);
procedure BTimerDynTimer(Sender: TObject);
procedure ASaveDataClick(Sender: TObject);
procedure SavePictureClick(Sender: TObject);
procedure AOpenClick(Sender: TObject);
procedure RadioDinTenClick(Sender: TObject);
procedure FreChange(Sender: TObject);
procedure TabVibEnter(Sender: TObject);
procedure TabDynEnter(Sender: TObject);
procedure TabWatEnter(Sender: TObject);
procedure PageControl1Change(Sender: TObject);
procedure WithDynClick(Sender: TObject);
procedure PrintClick(Sender: TObject);
procedure AFormActivate(Sender: TObject);
procedure NAboutClick(Sender: TObject);
procedure ChartMouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
  Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure ChartMouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);

```

```

procedure ChartMouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
  Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure PrevKusClick(Sender: TObject);
procedure NextKusClick(Sender: TObject);

procedure SpeedButton3Click(Sender: TObject);
procedure WayClick(Sender: TObject);
procedure EditVSKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
procedure EditVRKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
procedure TestSensPosClick(Sender: TObject);
procedure HideTestClick(Sender: TObject);
procedure EditTdelKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
procedure NumStrokeChange(Sender: TObject);
procedure ChStrokeClick(Sender: TObject; Button: TUDBtnType);
procedure EditTKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
procedure AviClick(Sender: TObject);
procedure Exit_Click(Sender: TObject);
procedure StartClick(Sender: TObject);
procedure StartActionClick(Sender: TObject);
procedure StopReadClick(Sender: TObject);
procedure MenuStopClick(Sender: TObject);
procedure MonoClick(Sender: TObject);
procedure GenWayClick(Sender: TObject);
procedure InstallSensorClick(Sender: TObject);
procedure SmoothClick(Sender: TObject);
procedure SeriesTenDbClick(Sender: TChartSeries; ValueIndex: Integer;
  Button: TMouseButton; Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure RadioDinADClick(Sender: TObject);
procedure GrafNLClick(Sender: TObject);
procedure GrafVSClick(Sender: TObject);
procedure GrafVRClick(Sender: TObject);
procedure SenDinClick(Sender: TObject);
procedure UOClick(Sender: TObject);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
  scan_level, scan_busy: boolean;
  CurrentVal: Integer;
  CurrentChart: Pchart;
  CurrentSeries: Pseries;
  procedure RefreshChart;
  procedure RefreshDyn;
  procedure RefreshWat;
  procedure RefreshAdd;
  procedure RefreshLines;
  procedure AddPointsWt;
  procedure AddPointsWS(Series: TChartSeries; Vbe, Ven: integer);

```

```

procedure CalcWat;
procedure Ave_din;
procedure DisplayHint(Sender: TObject);
procedure NewDynParam;
procedure ReturnFormCal;
procedure SaveInf;
procedure SaveDin;
procedure ReadDin;
procedure SaveWay;
procedure ReadWay;
procedure SaveBin(s:string);
procedure SaveText(s:string);
procedure ReadTextFile(s:string);
procedure ReadBin(s:string);
procedure MakePeri;
procedure MakeSinusoide(frr:double);
end;

const scan_tim = 0.1;

var
  Form1: TForm1;
  MesDin:boolean;
  MesWay:boolean;
  MesSound: boolean;
  MT:Double;
  MaxTime:Double;
  Nperi:Double;
  GaugeStep:integer;
  tcurr: TTime;
//vib:
  StartX,StartY,Vbeg,Vend,Vlen: integer;
  Vkus:double;
  VlenS:double;
  MaxP: integer;
  S0,S1:double;

//files
  f:textfile;
  fb: file of smallint;

implementation

uses w_well, w_edit, demo1, About, OkCancel1, Unit3, w_edval;

{$R *.DFM}

// ----- Begin & End -----

```

```

procedure TForm1.AFormActivate(Sender: TObject);
var i:Integer;
    Str:String;
begin
// read some ini
if FileExists('weird.ini') then
begin
    ReadCFG('weird.ini');
    diskr_din:=getinival('diskr_din'); diskr_i:=getinival('diskr_i');
    diskr_u:=getinival('diskr_u');    diskr_vib:=getinival('diskr_vib');

end
else
begin
    diskr_din:=1; diskr_i:=1; diskr_u:=1; diskr_vib:=1;
end;
//--- fill well combobox
if DMod.Table1.Active then
begin
    DMod.Table1.First;
    for i:=0 to DMod.Table1.RecordCount-1 do
    begin
        ComboBox1.Items.Add(DMod.Table1['Well_name']);
        DMod.Table1.Next;
    end;
    DMod.Table1.First;
end
else Application.messagebox('Some problems with databases','error',0);
ComboBox1.ItemIndex:=0;

//--- global variables etc.
WayFreq:=1000/TimerDyn.Interval;
PResSound:=@ResSound;

AMessClick(Sender);
ValidS:=true;WithDynClick(sender);

PageControl1.ActivePageIndex:=0;
PageControl1.Change(Sender); // freq,maxtime,nperi,maxnum,currentchart

sendinclick(sender);
MT:=MaxSBLen/Freq;
Vbeg:=0;
Application.OnHint := DisplayHint;
T_delay:=StrToInt(EditTdel.Text);
EditTime.Text:='16'; EditTimeChange(Sender);
end;

procedure TForm1.AMessClick(Sender: TObject);
var tmp:double;
begin
    Screen.Cursor := crHourglass;

```

```

//----- look for sensorpos
  if TestPos=false then begin Way.Checked:=false; SynWay.Checked:=false; end
    else ReadPos(tmp);
  TestSensPos.Visible:=Way.Checked;
//----- look for AD7714
  if TestDyn=false then begin din7714:=false;
    Application.MessageBox (' Ошибка идентификации. ',Error,0);
  end;

//----- for SB - dynagraph
  nul_lin:=0; // i.e. not measured yet
  mes_vs:=65537; // "-
  mes_vr:=65537; // "-
  disk_r_din:=1;

//----- begin level monitoring
  scan_level:=true;
  //timer1.interval:=round(scan_tim*2000); Timer1.Enabled:=true;

  Screen.Cursor := crArrow;
end;

procedure TForm1.ExitItClick(Sender: TObject);
begin Close; end;

procedure TForm1.NAboutClick(Sender: TObject);
begin AboutBox.ShowModal; end;

procedure TForm1.DisplayHint(Sender: TObject);
begin StatusBar1.SimpleText := GetLongHint(Application.Hint); end;

procedure TForm1.WellsClick(Sender: TObject);
begin
  FormWells.ShowModal; ComboBox1Change(Sender);
end;

procedure TForm1.ComboBox1Change(Sender: TObject);
begin
  DMod.Table1.Locate('Well_name',Variant(ComboBox1.Text),[loPartialKey]);
  DMod.GetIniAll;
  EditT.Text:=FloatToStrF(Period,ffFixed,18,3);
  EditSPM.Text:=FloatToStrF(60/din_peri,ffFixed,18,3);
  EditTimeChange(Sender);
  if mes_vs=65537 then begin disk_r_din:=1; nul_lin:=0; end;
end;

//-----Change page-----
procedure TForm1.PageControl1Change(Sender: TObject);
begin
  case PageControl1.ActivePageIndex of

```

```

    0: TabDynEnter(Sender);
    1: TabWatEnter(Sender);
    2: TabVibEnter(Sender);
end;
EditTimeChange(Sender);
end;

```

```

procedure TForm1.TabDynEnter(Sender: TObject);
begin
    CurrentChart:=@ChartDyn;
    CurrentSeries:=@SeriesUp;
    SelectChannel(0);
    MesDin:=true;
    MesWay:=Way.Checked;
    MesSound:=false;
    sendinclick(sender);
end;

```

```

procedure TForm1.TabWatEnter(Sender: TObject);
begin
    SelectChannel(2);
    din7714:=MesDin;
    MesWay:=Way.Checked;
    MesSound:=true;
    MaxP:=800;
end;

```

```

procedure TForm1.TabVibEnter(Sender: TObject);
begin
    SelectChannel(1);
    MesSound:=true;
    MaxP:=3000;
end;
//----- End Change page -----

```

```

//----- Change TimeEdits -----
procedure TForm1.EditTimeKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
begin
    if Key=VK_RETURN then EditTimeChange(Sender);
end;

```

```

procedure TForm1.EditTimeChange(Sender: TObject);
begin
    Freq:=44100;
    MaxTime:=StrToFlo(EditTime);
    if MaxTime>MT then MaxTime:=MT-1/freq;
    if MaxTime<0 then MaxTime:=-MAXtIME;
    if MaxTime=0 then MaxTime:=Period;
    MaxNum:=Ceil(MaxTime*Freq);

    MaxTime:=MaxNum/Freq;

```

```

Nperi:=MaxTime/Period;
if AlwaysInt.Checked then
begin
  NPeri:=Round(Nperi); if NPeri=0 then Nperi:=1;
  MaxTime:=Period*Nperi;
  MaxNum:=Ceil(MaxTime*Freq)+1;
end;
RefreshEdit(PanelTime);
end;

procedure TForm1.EditNperiKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
begin
  if Key=VK_RETURN then EditNperiChange(Sender);
end;

procedure TForm1.UpDown1ChangingEx(Sender: TObject;var AllowChange: Boolean;
  NewValue: Smallint;Direction: TUpDownDirection);
begin
  EditNperi.Text:=IntToStr(NewValue);
  EditNperiChange(Sender);
end;

procedure TForm1.EditNperiChange(Sender: TObject);
begin
  EditTime.Text:=FloatToStr(Ceil(StrToFlo(EditNperi)*Period*Freq)/Freq);
end;

procedure TForm1.AlwaysIntClick(Sender: TObject);
var np:integer;
begin
  np:=round(nperi); if np=0 then np:=1;
  if AlwaysInt.Checked then EditNperi.Text:=IntToStr(Np);
end;

procedure TForm1.RefreshEdit(Sender: TObject);
var np:integer;
begin
  EditTime.Text:=FloatToStrF(MaxTime,ffFixed,18,2);
  np:=round(nperi); if np=0 then np:=1;
  if AlwaysInt.Checked then
    EditNperi.Text:=IntToStr(Np)
  else EditNperi.Text:=FloatToStrF(Nperi,ffFixed,18,2);
  EditNum.Text:=IntToStr(MaxNum);
end;

//----- Gather Data -----
procedure TForm1.BStartClick(Sender: TObject);
var s,t:double;
    i:integer;
begin
  Timer1.interval:=500; scan_level:=false;

```

```

MaxAdd:=0;
EditTimeChange(Sender);

// wait for beg sin:
{!!} if SynWay.Checked then
begin
  ResTrans[0]:=ReadPos(t);
  repeat
    s:=ResTrans[0];
    ResTrans[0]:=ReadPos(ResTime[0]);
  until (Restrans[0]>s);
end;

// start SB
while scan_busy do Application.ProcessMessages;
if not (din7714 and MesDin) or messound then

  EditFile.Hide; LabF.Hide; EditDate.Hide; LabD.Hide;
  StatusBar1.SimpleText:='Процесс считывания данных...';
  Gauge1.Progress:=0;

  ChartDyn.Title.Text[0]:=DateTimeToStr(Date)+' '+TimeToStr(Time);
  tcurr:=Time;

  if MesWay or din7714 then
  begin
    TimerDyn.Enabled:=true;
    BTimerDynTimer(Sender); // first value
  end;
  GaugeStep:= Round(Timer1.Interval*1000/MaxTime);
  Timer1.Tag:=0; Timer1.Enabled:=true;
end;

procedure TForm1.BTimerDynTimer(Sender: TObject);
var s:double;
begin
  s:=ReadPos(ResTime[MaxAdd]);
  if din7714 then begin DigADC; ResDyn[MaxAdd]:=DigADC; end;
  if s>50000 then s:=s-65536;
  ResTrans[MaxAdd]:=s;
  inc(MaxAdd);
end;

//-----
procedure TForm1.BTimer1Timer(Sender: TObject);
var i,nn:integer;
    smleft,smright: smallint;
begin
  if scan_busy then exit;
  if scan_level then
  begin
    smleft:=0; smright:=0; nn:=round(scan_tim*freq) - 10;

```

```

for i:=0 to nn-1 do
begin
  if ResSound[i+i]>smleft then smleft:=Resound[i+i];
  if ResSound[i+i+1]>smright then smright:=Resound[i+i+1];
end;
Application.Processmessages;
exit;
end;

if Gauge1.Progress >= Gauge1.MaxValue then
begin
  BStopClick(Sender);
end
else begin
  Gauge1.Progress:=Gauge1.Progress+Gaugestep;
  if Timer1.Tag=1 then
  begin
    WaveInStop(HwaveIn^);
    MaxNum:=floor(Gauge1.Progress*MaxTime*Freq/Gauge1.MaxValue);
    MaxTime:=MaxNum/Freq;
    BStopClick(Sender);
  end;
end;
end;

procedure TForm1.MakePeri;
var i,j,k,np:integer;
begin
  din_p:=round(period*WayFreq); // supposed period (diskretes)
  np:=ceil(nperi); peri[0]:=0;
  for k:=1 to np do
  begin
    j:=min(peri[k-1]+din_p,MaxAdd-1); // supposed next beg
    mperi[k-1]:=MaxPos(ResTrans,peri[k-1],j); // current max
    i:=min(mperi[k-1]+din_p,MaxAdd-1); // supposed next mperi
    peri[k]:=MinPos(ResTrans,mperi[k-1],i); // next beg
    if peri[k]=peri[k-1] then peri[k]:=MaxAdd-1;
  end;
  peri[0]:=MinPos(ResTrans,0,mperi[0]-1); //first min (enigmatic, must be 0)
  mperi[np]:=MaxAdd-1; peri[np+1]:=MaxAdd-1; mperi[np+1]:=MaxAdd-1;
// real period (sek)
  if MaxAdd>Period*wayfreq then din_peri:=ResTime[peri[1]]-ResTime[peri[0]];
  if din_peri<>0 then din_spm:=60/din_peri;
end;

procedure TForm1.MakeSinusoide(frr:double);
var i,k,np:integer;
begin
  for i:=0 to MaxAdd-1 do
  begin
    // ResTime[i]:=i/frr;
    ResTrans[i]:=CalcWay(ResTime[i]);
  end;
end;

```

```

end;
np:=ceil(nperi); peri[0]:=0;
for k:=1 to np do
begin
    peri[k]:=min(round(k*period*fr),MaxAdd-1);
    mperi[k-1]:=MaxPos(ResTrans,peri[k-1],peri[k]);
end;
mperi[np]:=MaxAdd-1; peri[np+1]:=MaxAdd-1; mperi[np+1]:=MaxAdd-1;
end;

```

```

procedure TForm1.BStopClick(Sender: TObject);
var i,j,k,np:integer;
    mx,mn,smax,nrm:double;
var Save_Cursor:TCursor;
begin
    TimerDyn.Enabled:=false; Timer1.Enabled:=false;
    Save_Cursor := Screen.Cursor; Screen.Cursor := crHourglass;

    StatusBar1.SimpleText:= 'Измерения завершены. Выборка - '+ IntToStr(MaxNum)+ '
        'отсчетов';
    Gauge1.Progress:=Gauge1.MaxValue;

    if MesWay then // if position sensor used
    begin
        din_p:=round(period*WayFreq); // supposed period (diskretes)
        j:=min(din_p div 2, MaxAdd-1); if j=0 then j:=1;
// real WayFreq (on half of supposed period):
        din_dt:=(ResTime[j]-ResTime[0])/j; if din_dt=0 then din_dt:=1/WayFreq;
        din_fre:=1/din_dt;
        // Fre.Text:=FloatToStr(din_fre);

// correct time to begin from 0:
        for j:=1 to MaxAdd-1 do
// if time = $ffff then add 73 sek (ffff*quant)
// !! correct for Maxtime<73 sek only !!
            if (ResTime[j]<ResTime[j-1]) then
                ResTime[j]:=ResTime[j]+$ffff*quant;
        for i:=1 to MaxAdd-1 do
            ResTime[i]:=ResTime[i]-ResTime[0];
            ResTime[0]:=0;

// define period limits
        MakePeri;

// norm S:
        mx:=MaxVal(ResTrans,0,MaxAdd-1);
        mn:=MinVal(ResTrans,0,MaxAdd-1);
        if MaxAdd>din_p then smax:= stroke_len
            else smax:=stroke_len/2*(1-cos(Pi*stroke_num/30*(MaxAdd-1-peri[0])/WayFreq));
        if mx=mn then nrm:=1 else // mx=mn if s=const (sensor connected, but doesnt rotate)
            nrm:= smax/(mx-mn);
        for i:=0 to MaxAdd-1 do

```

```

ResTrans[i]:=(ResTrans[i]-mn)*nrm;

// FOR SB-DYNAGRAPH:
if not din7714 then
begin
if Amp_detect=1 then
application.messagebox('maybe no modulated signal','Error',0);
// make peri's for dynagraph:
for i:=0 to ceil(nperi) do
begin
peri[i]:=min(round(ResTime[peri[i]]*Fre_dinSB),MaxNum-1);
mperi[i]:=min(round(ResTime[mperi[i]]*Fre_dinSB),MaxNum-1);
end;
// linear interpolation to get ResTime, ResTrans with 256 Hz instead of 18 Hz:
for i:=MaxNum-1 downto 0 do
ResTrans[i]:=CalcTrans1(ResTimeSB[i]);
for i:=0 to MaxNum-1 do ResTime[i]:=ResTimeSB[i];
if mx=mn then mperi[0]:=peri[1]; // if s=const
end;
end // end if way sensor works

else // no sensor - make sinusoide:
begin // for vib, wat
if (not MesDin) or din7714 then
begin
MaxAdd:=round(MaxTime*wayfreq);
MakeSinusoide(WayFreq);
end
else // for dynagraph
begin
if Amp_detect=1 then
application.messagebox('maybe no modulated signal','Error',0);
MaxAdd:=MaxNum;
MakeSinusoide(fre_dinSB);
end; // end for din
end; // end making sinusoide
// ----- end way

// for dynagraph anyway:
if MesDin and Avi.Checked then Ave_din; // average it

// fill ComboBox "Stroke":
NumStroke.Items.Clear; //NumStroke.Items.Add('All');
for i:=0 to ceil(nperi)-1 do NumStroke.Items.Add(IntToStr(i+1));
NumStroke.Items.Add('All'); NumStroke.ItemIndex:=0;

Screen.Cursor:=Save_Cursor;

RefreshChart;

```

end;

end;

```

procedure TForm1.Ave_din;
var ave:double;
    nave,i,j,k:integer;
    buf: array of double;
begin
    nave:=StrToint(Enave.Text); SetLength(buf,2*nave);
    for i:=nave to MaxAdd-nave do
        begin
            ave:=0;
            for j:=-nave to nave-1 do ave:=ave+ResDyn[i+j];
            k:=i mod nave;
            buf[k]:=ave/(nave+nave);
            if i>=nave*2 then ResDyn[i-nave]:=buf[k];
        end;
end;

```

```

procedure TForm1.AviClick(Sender: TObject);
begin
    if not Avi.Checked then exit;
    Ave_din;
    RefreshDyn;
    SmoothClick(Sender);
end;

```

```

procedure TForm1.NewDynParam;
begin
    EditVR.Text:=FloatToStrF(vaga_rid,ffFixed,18,3);
    EditVS.Text:=FloatToStrF(vaga_st,ffFixed,18,3);
    EditMaxP.Text:=FloatToStrF((max_p-nul_lin)*diskr_din,ffFixed,18,3);
    EditKp.Text:=FloatToStrF(koef_pod,ffFixed,18,4);
    EditKn.Text:=FloatToStrF(koef_nap,ffFixed,18,4);
    EditT.Text:=FloatToStrF(din_peri,ffFixed,10,4);
    EditSPM.Text:=FloatToStrF(din_spm,ffFixed,10,3);
end;
//----- End Gather data -----

```

```

//----- SB results -----

```

```

procedure TForm1.CalcWat;
var i,np:Integer;
begin
// right periods:
    np:=ceil(nperi);
    if peri[np]>MaxNum-3 then
        for i:=0 to np do
            begin
                wperi[i]:=peri[i];
                wmperi[i]:=mperi[i];
                peri[i]:=min(round(peri[i]/Freq),MaxNum-1);
            end;
        end;
end;

```

```

    mperi[i]:=min(round(mperi[i]/Freq),MaxNum-1);
end
else
for i:=0 to np do
begin
    wperi[i]:=min(round(ResTime[peri[i]]*Freq),MaxNum-1);
    wmperi[i]:=min(round(ResTime[mperi[i]]*Freq),MaxNum-1);
end;
end;

procedure TForm1.ASaveDataClick(Sender: TObject);
var f : textfile;
    i : Longint;
    s,s1 : string;
    k:integer;
    const pnt = 'sn';
    var Save_Cursor: TCursor;
begin
    timer1.interval:=round(scan_tim*2000); timer1.enabled:=true;

    SaveDialog1.FilterIndex:=PageControl1.ActivePageIndex+1;
    s:=CurrentChart^.Leftaxis.Title.Caption+FormatDateTime('ddmm',Date);
    SaveDialog1.FileName:=s;
    if not SaveDialog1.Execute then exit;

    Save_Cursor := Screen.Cursor; Screen.Cursor := crHourglass;

// .inf file
    SaveInf;

// data file
    s:= SaveDialog1.FileName + FILEEXT[SaveDialog1.FilterIndex-1];
    case SaveDialog1.FilterIndex of //1-din,2-iu,3-vib,4-ui,5-vi
        2..3: SaveText(s);
        4..5: SaveBin(s);
    end;
    if MesDin then SaveDin;
    scan_level:=true;
    Screen.Cursor := Save_Cursor;
end;

procedure TForm1.SaveInf;
var s:string;
    i:integer;
begin
    s:=SaveDialog1.FileName;
    i:=LastDelimiter('.',s); if i<>0 then SaveDialog1.FileName:=copy(s,0,i-1);
    s:= SaveDialog1.FileName + '.inf';
    AssignFile(f,s); ReWrite(f);
// common
    writeln(f,IDENTIF);
    writeln(f,'well_name='+well_name);

```

```
writeln(f,'date='+FormatDateTime('dd.mm.yy',Date));
writeln(f,'time='+FormatDateTime('hh:nn',tcurr));
writeln(f,'freq='+FloatToStr(Freq));
writeln(f,'write_time='+FloatToStr(MaxTime));
writeln(f,'all='+IntToStr(MaxNum));
writeln(f,'period='+FloatToStr(din_peri));
if MesWay then s:='1' else s:='0';   writeln(f,'sensorpos='+s);
```

```
if MesDin then
```

```
begin
```

```
  writeln(f,'nul_lin='+FloatToStr(nul_lin)); // discretas
  writeln(f,'mes_vs='+FloatToStr(mes_vs)); // diskretas
  writeln(f,'mes_vr='+FloatToStr(mes_vr)); // diskretas
  writeln(f,'vaga_rid='+FloatToStr(vaga_rid)); // tonns
  writeln(f,'vaga_st='+FloatToStr(vaga_st)); // tonns
  writeln(f,'diskr_din='+FloatToStr(diskr_din)); // tonns/diskretas
  if (MaxTime>Period-2/wayfreq) then
```

```
    begin
```

```
      writeln(f,'koef_napovn='+FloatToStr(koef_nap));
      writeln(f,'koef_podachi='+FloatToStr(koef_pod));
      writeln(f,'din_area='+FloatToStr(din_area));
      writeln(f,'din_spm='+FloatToStr(din_spm));
```

```
    end;
```

```
end;
```

```
case PageControll.ActivePageIndex of
```

```
1: begin
```

```
  writeln(f,'diskr_u='+FloatToStr(diskr_u));
  writeln(f,'diskr_i='+FloatToStr(diskr_i));
end;
```

```
2: begin
```

```
  writeln(f,'diskr_vib='+FloatToStr(diskr_vib));
end;
```

```
end;
```

```
write(f,'peri= ');
```

```
for i:=0 to ceil(nperi) do write (f,peri[i]:8);   writeln(f);
```

```
write(f,'mperi= ');
```

```
for i:=0 to ceil(nperi) do write (f,mperi[i]:8);   writeln(f);
```

```
Closefile(f);
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.SaveText(s:string);
```

```
var i,endall:integer;
```

```
begin
```

```
  AssignFile(f,s);   Rewrite(f);
  for i:=0 to endall-1 do Writeln(f,IntToStr(ResSound[i]));
  closefile(f);
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.ReadTextFile(s:string);
```

```

begin
  AssignFile(f,s);  Reset(f); MaxNum:=0;
  while not eof(f) do
    begin Readln(F,S); ResSound[MaxNum]:= StrToInt(S); inc(MaxNum); end;
  closefile(f);
end;

```

```

procedure TForm1.ReadBin(s:string);
var tmp:SMALLINT;
begin
  AssignFile(fb,s);  ReSet(fb);
  MaxNum:=0;
  while not eof(Fb) do
    begin
      ResSound[MaxNum]:=tmp;
      inc(MaxNum);
    end;
  CloseFile(Fb);
end;

```

```

procedure TForm1.SaveBin(s:string);
var i,endall:integer;
begin
  AssignFile(fb,s);  ReWrite(fb);
  for i:=0 to endall-1 do Write(fb,ResSound[i]);
  CloseFile(fb);
end;

```

```

procedure TForm1.SaveWay;
var s:string;
    i:integer;
begin
  s:= SaveDialog1.FileName + '.s';
  AssignFile(f,s); ReWrite(f);
  for i:=0 to MaxAdd-1 do
    Writeln(f,FloatToStr(ResTrans[i])+ '|' +FloatToStr(ResTime[i]));
  CloseFile(f);
end;

```

```

procedure TForm1.Readway;
var s,s1:string;
    i:integer;
begin
  s:=OpenDialog1.FileName;
  i:=LastDelimiter('.',S); Delete(S,i,Length(S)-i+1); s:=s+'.s';
  if FileExists(s) then
    begin
      ValidS:=true;
      AssignFile(F,s); Reset(F); MaxAdd:=0;
      while not eof(F) do
        begin

```

```

    Readln(F,s);
    i:=LastDelimiter('|',S); s1:=s; Delete(S,i,Length(S)-i+1);
    ResTrans[MaxAdd]:=StrToFloat(s);
    Delete(S1,1,i);
    ResTime[MaxAdd]:=StrToFloat(s1);
    inc(MaxAdd);
end;
dec(MaxAdd);
if PageControl1.ActivePageIndex=2 then
begin
end;
end
else if PageControl1.ActivePageIndex<2 then //if no .s file for din,wat
begin
    MaxAdd:=ceil(MaxTime*WayFreq);
    for i:=0 to MaxAdd-1 do
    begin
        ResTime[i]:=i/WayFreq;
        ResTrans[i]:=CalcWay(i/WayFreq);
    end;
end
else begin end;
end;

procedure TForm1.SaveDin;
var s:string;
    i:integer;
begin
    s:= SaveDialog1.FileName + '.din';
    AssignFile(f,s); ReWrite(f);
    for i:=0 to MaxAdd-1 do Writeln(f,FloatToStr(ResDyn[i]));
    Closefile(f);
end;

procedure TForm1.ReadDin;
var s:string;
begin
    s:= OpenFileDialog1.FileName{ + '.din'};
    AssignFile(f,s); Reset(f); MaxAdd:=0;
    while not eof(F) do
    begin Readln(F,S); ResDyn[MaxAdd]:= StrToFloat(S); inc(MaxAdd); end;
    Closefile(f);
end;

procedure TForm1.AOpenClick(Sender: TObject);
var S,s1,fname:string;
    temp:double;
    i,j,k,np,nc:integer;
    Save_Cursor: TCursor;
begin
    OpenFileDialog1.FilterIndex:=PageControl1.ActivePageIndex+1;
    if not OpenFileDialog1.Execute then exit;

```

```

Save_Cursor := Screen.Cursor;   Screen.Cursor := crHourglass;
scan_level:=false;
StatusBar1.SimpleText:='Чтение данных из файла...';
Application.ProcessMessages;
fname:=OpenDialog1.FileName;
k:=LastDelimiter('.',fname); fname:=copy(fname,0,k)+'inf';
if FileExists(fname) then ReadCFG(fname);

fname:=OpenDialog1.FileName; k:= LastDelimiter('\',fname); Delete(fname,1,k);
EditFile.Text:=fname; EditFile.Show; LabF.Show;

case OpenDialog1.FilterIndex of      // choose right page
1: begin Pagecontrol1.ActivePageIndex:=0; TabDynEnter(Sender); end;
2: begin Pagecontrol1.ActivePageIndex:=1; TabWatEnter(Sender); end;
3: begin Pagecontrol1.ActivePageIndex:=2; TabVibEnter(Sender); end;
4..5: begin Pagecontrol1.ActivePageIndex:=1; TabWatEnter(Sender); end;
6: begin Pagecontrol1.ActivePageIndex:=2; TabVibEnter(Sender); end;
end;

s:=getinichar('well_name'); if s<>'null' then
begin ComboBox1.Text:=s; ComboBox1Change(Sender); end;
temp:=getinival('freq'); if temp<>-1 then Freq:=temp;
temp:=getinival('all'); if temp<>-1 then MaxNum:=round(temp) else MaxNum:=1;
temp:=getinival('write_time'); if temp<>-1 then MaxTime:=temp
    else MaxTime:=ceil(MaxNum/Freq);
temp:=getinival('point');
temp:=getinival('stereo');
temp:=getinival('sensorpos'); if temp<>-1 then
    if temp=0 then Way.Checked:=false else Way.Checked:=true;

    ValidS:=Way.Checked; ValidP:=false; // BUG: never saves .din

s:=getinichar('date'); if s<>'null' then
begin EditDate.Text:=s; EditDate.Show; LabD.Show; end;
s:=getinichar('time'); if s<>'null' then tcurr:=StrToTime(s);

nperi:=MaxTime/period; np:=ceil(nperi);
// read data:
case OpenDialog1.FilterIndex of
1: ReadDin;
2..3: ReadTextFile(fname);
4..5: ReadBin(fname);
end;
ReadWay;

//Freq et al. parameters
case PageControl1.ActivePageIndex of
0: begin //Fre.Text:=FloatToStr(freq);
temp:=getinival('diskr_din'); if temp<>-1 then diskr_din:=temp;
temp:=getinival('nul_lin'); if temp<>-1 then nul_lin:=temp;
temp:=getinival('mes_vs'); if temp<>-1 then mes_vs:=temp;

```

```
temp:=getinival('mes_vr'); if temp<>-1 then mes_vr:=temp;
```

```
EditVR.Text:=FloatToStr(vaga_rid);
```

```
EditVS.Text:=FloatToStr(vaga_st);
```

```
temp:=getinival('din_area'); if temp<>-1 then din_area:=temp;
```

```
temp:=getinival('din_spm'); if temp<>-1 then din_spm:=temp;
```

```
EditSPM.Text:=FloatToStr(din_spm);
```

```
DMod.DefineDynParam(0);NewDynParam;
```

```
ChartDyn.Title.Text[0]:=ComboBox1.Text+' ,
```

```
+EditDate.Text+' '+TimeToStr(tcurr);
```

```
NumStroke.Items.Clear; //NumStroke.Items.Add('All');
```

```
for i:=0 to np-2 do NumStroke.Items.Add(IntToStr(i+1));
```

```
NumStroke.Items.Add('All');
```

```
NumStroke.ItemIndex:=0;
```

```
Maxtime:=Maxnum/fre_dinsb;
```

```
end;
```

```
end;
```

```
MakePeri;
```

```
EditTime.Text:=FloatToStrF(MaxTime,ffFixed,10,2); EditTimeChange(Sender);
```

```
StatusBar1.Simpletext:=";
```

```
Screen.Cursor := Save_Cursor;
```

```
RefreshChart;
```

```
scan_level:=true;
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.SavePictureClick(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
if SavePictureDialog1.Execute then
```

```
begin
```

```
CurrentChart^.Gradient.Visible:=false;
```

```
if SavePictureDialog1.FilterIndex=1 then
```

```
CurrentChart^.SaveToBitmapFile(SavePictureDialog1.FileName+'.bmp')
```

```
else
```

```
CurrentChart^.SaveToMetaFile(SavePictureDialog1.FileName+'.wmf');
```

```
CurrentChart^.Gradient.Visible:=true;
```

```
end;
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.PrintClick(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
CurrentChart^.Gradient.Visible:=false;
```

```
CurrentChart^.Print;
```

```
CurrentChart^.Gradient.Visible:=true;
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.SpeedButton3Click(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```

CurrentChart^.Gradient.Visible:=false;
CurrentChart^.CopyToClipboardMetafile(false);
CurrentChart^.Gradient.Visible:=true;
end;

//----- Services -----
procedure TForm1.RefreshChart;
var dx:double;
    t:integer;
    that:double;
    txt:string;
var Save_Cursor:TCursor;
begin
    txt:=StatusBar1.SimpleText;
    StatusBar1.SimpleText:='Малюю графік...';
    Application.Processmessages;
    case PageControl1.ActivePageIndex of
    0: numstrokechange(form1); //RefreshDyn;
    1: RefreshWat;
    2:
        begin
            Save_Cursor := Screen.Cursor;
            Screen.Cursor := crHourglass;
            dx:=diskr_vib;

            vkus:=MaxNum/maxp; that:=0;
        {
            if Nois then
            begin
                while that<MaxNum do
                begin
                    t:=round(that);
                    SeriesX.AddXY(t/Freq,dx*ResNoise[t+t],"clTeeColor);
                    SeriesY.AddXY(t/Freq,dx*ResNoise[t+t+1],"clTeeColor);
                    that:=that+Vkus;
                end;
                Nois:=false;
                ChartVib.Title.Text[1]:='(Noise)';
            end
            else
        }

        Screen.Cursor := Save_Cursor;
        end;
        end;
        StatusBar1.SimpleText:=txt;
        CurrentChart^.Visible:=true;
    end;

procedure TForm1.RefreshAdd;
var i:integer;

```

```

mx,mn,nrm:double;
begin
  mx:=MaxVal(CurrentAdd^,0,MaxAdd-1); if mx=0 then mx:=1; //???????
  mn:=MinVal(CurrentAdd^,0,MaxAdd-1);
  for i:=1 to MaxAdd-1 do
end;

procedure TForm1.RefreshDyn;
var i,k,np: integer;
    var Save_Cursor: TCursor;
begin
  Save_Cursor := Screen.Cursor;
  Screen.Cursor := crHourglass;
  SeriesUp.Clear;SeriesDown.Clear;SeriesTen.Clear;SeriesWay.Clear;SeriesWayTeor.Clear;
  np:=floor(nperi);
  for k:=0 to np do
  begin
    if peri[k]=mperi[k] then break;
    for i:=peri[k] to mperi[k]-1 do
      SeriesUp.Addxy(ResTrans[i],[ResDyn[i]-nul_lin]*diskr_din,"clTeeColor);
    if mperi[k]=peri[k+1] then break;
    for i:=mperi[k] to peri[k+1] do
      SeriesDown.Addxy(ResTrans[i],[ResDyn[i]-nul_lin]*diskr_din,"clTeeColor);
  end;

  for i:=0 to peri[np] do
  begin
if UO.ItemIndex=0 then
  SeriesTen.Addxy(ResTime[i],[ResDyn[i]-nul_lin]*diskr_din,"clTeeColor)
else  SeriesTen.Addxy(ResTime[i],ResDyn[i],"clTeeColor);

    SeriesWay.Addxy(ResTime[i],ResTrans[i],"clTeecolor);
    SeriesWayTeor.Addxy(ResTime[i],CalcWay(ResTime[i]),"clTeecolor);
  end;
  RadioDinTenClick(Form1);
  Screen.Cursor := Save_Cursor;
end;

procedure TForm1.NumStrokeChange(Sender: TObject);
var i,np: integer;
    var Save_Cursor: TCursor;
begin
  Save_Cursor := Screen.Cursor;
  Screen.Cursor := crHourglass;
  SeriesUp.Clear; SeriesDown.Clear;SeriesTen.Clear;SeriesWay.Clear;SeriesWayTeor.Clear;
  np:=NumStroke.ItemIndex; if np=-1 then np:=0;
  if np=NumStroke.Items.Count-1 then RefreshDyn  else
  begin
    for i:=peri[np] to mperi[np] do
      SeriesUp.Addxy(ResTrans[i],[ResDyn[i]-nul_lin]*diskr_din,"clTeeColor);
    for i:=mperi[np] to peri[np+1] do
      SeriesDown.Addxy(ResTrans[i],[ResDyn[i]-nul_lin]*diskr_din,"clTeeColor);
  end;
end;

```

```

    for i:=peri[np] to peri[np+1]-1 do
    begin
if UO.itemindex=0 then
    SeriesTen.Addxy(ResTime[i],(ResDyn[i]-nul_lin)*diskr_din,"clTeeColor)
else  SeriesTen.Addxy(ResTime[i],ResDyn[i],"clTeeColor);
    SeriesWay.Addxy(ResTime[i],ResTrans[i],"clTeecolor);
    SeriesWayTeor.Addxy(ResTime[i],CalcWay(ResTime[i]-ResTime[peri[np-
1]]),"clTeecolor);
    end;
end;

Dmod.DefineDynParam(np);
NewDynParam;    // put to edits

RadioDinTenClick(Form1);
ChartDyn.BottomAxis.Minimum:=0;
ChartDyn.BottomAxis.Maximum:=CurrentSeries^.MaxXValue;
ChartDyn.BottomAxis.Minimum:=CurrentSeries^.MinXValue;

Screen.Cursor := Save_Cursor;
end;

procedure TForm1.ChStrokeClick(Sender: TObject; Button: TUDBtnType);
begin
    if (Button=btPrev) and (NumStroke.ItemIndex>0) then
    begin NumStroke.ItemIndex:=NumStroke.ItemIndex-1; NumStrokeChange(Sender); end;
    if (Button=btNext) and (NumStroke.ItemIndex<NumStroke.Items.Count) then
    begin NumStroke.ItemIndex:=NumStroke.ItemIndex+1; NumStrokeChange(Sender); end;
end;

procedure TForm1.RefreshLines;
begin
    SeriesVS.Clear; SeriesVR.Clear; SeriesNL.Clear;
    SeriesNL.AddXY(CurrentSeries^.MinXValue,0,"clTeeColor);
    SeriesNL.AddXY(CurrentSeries^.MaxXValue,0,"clTeeColor);
//  if peri[1]=mperi[1] then exit;
    SeriesVS.AddXY(CurrentSeries^.MinXValue,vaga_st,"clTeeColor);
    SeriesVR.AddXY(CurrentSeries^.MaxXValue,vaga_rid,"clTeeColor);
    if (RadioDinTen.ItemIndex=1) or (MaxTime<Period/2) then
    begin
        SeriesVS.AddXY(CurrentSeries^.MaxXValue,vaga_st,"clTeeColor);
        SeriesVR.AddXY(CurrentSeries^.MinXValue,vaga_rid,"clTeeColor);
    end
    else
    begin
        SeriesVS.AddXY(stroke_len-lambada,vaga_st,"clTeeColor);
        SeriesVS.AddXY(stroke_len,vaga_rid,"clTeeColor);
        SeriesVR.AddXY(lambada,vaga_rid,"clTeeColor);
        SeriesVR.AddXY(CurrentSeries^.MinXValue,vaga_st,"clTeeColor);
    end
end;
end;

```

```

procedure TForm1.RadioDinTenClick(Sender: TObject);
begin
  ChartDyn.UndoZoom;
  case RadioDinTen.ItemIndex of
  0: begin
    ChartDyn.Leftaxis.Title.Caption:='P';
    ChartDyn.Bottomaxis.Title.Caption:='S, m';
    CurrentSeries:=@SeriesUp;
    SeriesUp.Active:=true;    SeriesDown.Active:=true;
    SeriesTen.Active:=false;  SeriesNL.Active:=GrafNL.Checked;
    SeriesVR.Active:=GrafVR.Checked; SeriesVS.Active:=GrafVS.Checked;
    SeriesWay.Active:=false;  SeriesWayTeor.Active:=false;
    end;
  1: begin
    ChartDyn.Leftaxis.Title.Caption:='P';
    ChartDyn.Bottomaxis.Title.Caption:='t, c';
    CurrentSeries:=@SeriesTen;
    SeriesUp.Active:=false;    SeriesDown.Active:=false;
    SeriesTen.Active:=true;    SeriesNL.Active:=GrafNL.Checked;
    SeriesVR.Active:=GrafVR.Checked; SeriesVS.Active:=GrafVS.Checked;
    SeriesWay.Active:=false;  SeriesWayTeor.Active:=false;
    end;
  2: begin
    ChartDyn.Leftaxis.Title.Caption:='S';
    ChartDyn.Bottomaxis.Title.Caption:='t, c';
    CurrentSeries:=@SeriesWay;
    SeriesUp.Active:=false;    SeriesDown.Active:=false;
    SeriesTen.Active:=false;  SeriesNL.Active:=false;
    SeriesVR.Active:=false;   SeriesVS.Active:=false;
    SeriesWay.Active:=true;    SeriesWayTeor.Active:=true;
    end;
  end;
end;

//----- Advanced Chart Zoom -----
procedure TForm1.ChartMouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
  Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
begin
  if Button=mbLeft then
    begin
      StartX:=X; StartY:=Y;
      Vbeg:=round(CurrentSeries^.XScreenToValue(X)*freq);
      if Vbeg<0 then Vbeg:=0;
    end;
  end;
end;

procedure TForm1.ChartMouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
begin

```

```

if ssLeft in Shift then
begin
  CurrentChart^.Refresh;
  CurrentChart^.Canvas.MoveTo(Startx,Starty);
  CurrentChart^.Canvas.Lineto(StartX,y);
  CurrentChart^.Canvas.Lineto(X,y);
  CurrentChart^.Canvas.Lineto(X,Starty);
  CurrentChart^.Canvas.Lineto(StartX,Starty);
end;
end;

//----- WAT -----
procedure TForm1.AddPointsWt;
var t:integer;
    dx,that:double;
begin
  if(Vend-Vbeg>maxp) then vkus:=(Vend-Vbeg)/maxp else vkus:=1;
  that:=vbeg;

end;

procedure TForm1.AddPointsWS(Series:TChartSeries;Vbe,Ven:integer);
var t:integer;
    dx,that,kus:double;
begin
  if Ven<=Vbe then exit; that:=vbe;
  if(Ven-Vbe>maxp) then kus:=(Ven-Vbe)/maxp else kus:=1;
  dx:=diskr_u*diskr_i;
  Series.Clear;

end;

procedure TForm1.ChartMouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
  Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
begin
  if (Button<>mbLeft) or (StartX=X) then exit;
  Vend:=round(CurrentSeries^.XScreenToValue(X)*Freq);
  if Vend>=MaxNum then Vend:=MaxNum-1;
  if Vend<=Vbeg then
  begin
    Vbeg:=0; Vend:=MaxNum-1;

  end;

  Vlen:=Vend-Vbeg;
end;

```

```

procedure TForm1.PrevKusClick(Sender: TObject);
begin
  if Vbeg-Vlen>0 then Vbeg:=Vbeg-Vlen else Vbeg:=0;
  Vend:=Vbeg+Vlen+1;
end;

```

```

procedure TForm1.NextKusClick(Sender: TObject);
begin
  if Vend+Vlen<MaxNum then Vend:=Vend+Vlen else Vend:=MaxNum;
  Vbeg:=Vend-Vlen-1;
end;

```

```

procedure TForm1.WayClick(Sender: TObject);
begin
  if (PageControl1.ActivePageIndex=2)
  then MesWay:=false
  else MesWay:=Way.Checked;
  TestSensPos.Visible:=Way.Checked;
end;

```

```

procedure TForm1.EditVSKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
begin
  if Key<>VK_RETURN then exit;
  vaga_st:=StrToFlo(EditVS);
  RefreshLines;
end;

```

```

procedure TForm1.EditVRKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
begin
  if Key<>VK_RETURN then exit;
  vaga_rid:=StrToFlo(EditVR);
  RefreshLines;
end;

```

```

procedure TForm1.EditTKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
begin
  if Key<>VK_RETURN then exit;
  din_peri:=StrToFlo(EditT);
  NumStrokeChange(Sender);
end;

```

```

procedure TForm1.TestSensPosClick(Sender: TObject);
var ttt:double;
    xxx:word;
begin
  xxx:=ReadPos(ttt);
  Maskedit1.Show;
  MaskEdit1.Text:='Time = '+FloatToStrF(ttt,ffixed,10,2)+' Pos = '+intToStr(xxx);

```

```
HideTest.Show;
end;
```

```
procedure TForm1.HideTestClick(Sender: TObject);
begin
  Maskedit1.Hide;   HideTest.Hide;
end;
```

```
procedure TForm1.EditTdelKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
begin
  if Key=VK_RETURN then T_delay:=StrToInt(EditTdel.Text);
end;
```

```
procedure TForm1.FreChange(Sender: TObject);
begin
  // WayFreq:=StrToFloat(Fre.Text);   Freq:=WayFreq;
  //T_delay:=Tdel[Fre.ItemIndex];
  EditTdel.Text:=IntToStr(T_delay);
  EditTimeChange(Sender);
  if EditFile.Visible then RefreshChart;
end;
```

```
procedure TForm1.Exit_Click(Sender: TObject);
begin
  Close;
end;
```

```
procedure TForm1.StartClick(Sender: TObject);
begin
  BStartClick(sender);
end;
```

```
procedure TForm1.StartActionClick(Sender: TObject);
begin
  BStartClick(sender);
end;
```

```
procedure TForm1.StopReadClick(Sender: TObject);
begin
  Timer1.Tag:=1;
end;
```

```
procedure TForm1.MenuStopClick(Sender: TObject);
begin
  StopReadClick(Sender); //Murk
end;
```

```
procedure TForm1.MonoClick(Sender: TObject);
begin
  // if EditFile.Visible then RefreshChart;
```

end;

```

procedure TForm1.GenWayClick(Sender: TObject);
var i,k,np:integer;
    fase:double;
begin
    fase:=StrToFloat(EditFase.Text);
    for i:=0 to MaxAdd-1 do
        ResTrans[i]:=CalcWay(ResTime[i]-fase);

    np:=ceil(nperi);
    peri[0]:=MinPos(ResTrans,0,round(period*fre_dinSB));
    for k:=1 to np do
        begin
            peri[k]:=min(round(k*period*fre_dinSB+fase*fre_dinSB),MaxAdd-1);
            mperi[k-1]:=MaxPos(ResTrans,peri[k-1],peri[k]);
        end;
    NumStrokeChange(Sender);
end;

```

```

procedure TForm1.InstallSensorClick(Sender: TObject);
begin
    FormCal.RadioGroup1.ItemIndex:=1;
    FormCal.Edit2.Text:=FloatToStrF(teor_vs,ffFixed,10,3);
    Timer1.enabled:=false;
    FormCal.ShowModal;
    Timer1.enabled:=true;
    ReturnFormCal;
end;

```

```

procedure TForm1.ReturnFormCal;
begin
    case FormCal.Radiogroup1.Itemindex of
    0: if (nul_lin<>0) and (mes_vs<>65537) then
        disk_r_din:=teor_vs/(mes_vs-nul_lin);
    1:
        begin
            if (nul_lin<>0) and (mes_vs<>65537) then
                disk_r_din:=teor_vs/(mes_vs-nul_lin);
            EditVS.Text:=FloatToStrF(teor_vs,ffFixed,18,3);
            if SeriesVS.Active then begin
                SeriesVS.Clear;
                SeriesVS.AddXY(CurrentSeries^.MinXValue,(mes_vs-nul_lin)*disk_r_din,"clTeeColor);
                SeriesVS.AddXY(CurrentSeries^.MaxXValue,(mes_vs-nul_lin)*disk_r_din,"clTeeColor);
            end;
        end;
    2:
        begin
            if (nul_lin=0) and (mes_vs<>65537) and (mes_vr<>65537) then
                disk_r_din:=(teor_vr-teor_vs)/(mes_vr-mes_vs);
            EditVR.Text:=FloatToStrF(teor_vr,ffFixed,18,3);
            if SeriesVR.Active then begin

```

```

    SeriesVR.Clear;
    SeriesVR.AddXY(CurrentSeries^.MinXValue,(mes_vr-nul_lin)*diskr_din,",clTeeColor);
    SeriesVR.AddXY(CurrentSeries^.MaxXValue,(mes_vr-nul_lin)*diskr_din,",clTeeColor);
    end;
  end;
end; //case
end;

```

```
//----- end calibration form
```

```

procedure TForm1.SmoothClick(Sender: TObject);
var i:integer;
    beg: integer;
    vr,vs,vmin,vmax:double;
begin
  vmin:=MinVal(ResDyn,0,maxadd-1);
  vmax:=maxval(resdyn,0,maxadd-1);
  vr:=(vmax-vmin)/3;
  for i:=1 to maxadd-1 do
    if abs(resdyn[i]-resdyn[i-1])>vr then
      resdyn[i]:=resdyn[i-1]+(resdyn[i]-resdyn[i-1])/2;
    Refreshchart;
  end;
end;

```

```

procedure TForm1.SeriesTenDbClick(Sender: TChartSeries;
  ValueIndex: Integer; Button: TMouseButton; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
begin
  FormValEdit.Edit1.Text:=FloatToStr(Sender.YValues[ValueIndex+1]);
  FormValedit.Edit2.text:=FloatToStrf(Sender.Yvalues[valueindex+1],ffixed,10,3);
  if FormValedit.Showmodal=mrOk then
    ResDyn[valueindex+1]:=StrToFlo(FormvalEdit.Edit2);
  Refreshchart;
end;

```

```

procedure TForm1.RadioDinADCClick(Sender: TObject);
begin
  if pagecontrol1.ActivePageIndex=1 then
    begin Mesdin:=din7714;
    end;
end;

```

```

procedure TForm1.GrafNLClick(Sender: TObject);
begin
  SeriesNL.Active:=GrafNL.Checked; RadioDinTenClick(Sender);
end;

```

```

procedure TForm1.GrafVSClick(Sender: TObject);
begin
  SeriesVS.Active:=GrafVS.checked; RadioDinTenClick(Sender);
end;

```

```

procedure TForm1.GrafVRClick(Sender: TObject);

```

```

begin
  SeriesVR.Active:=GrafVR.Checked; RadioDinTenClick(Sender);
end;

procedure TForm1.SenDinClick(Sender: TObject);
begin
  if sendin.itemindex=0 then
    begin
      fgen:=fgen1; spoiled:=spoiled1;
      nav:= nav1;
    end
  else begin
      fgen:=fgen2; spoiled:=spoiled2;
      nav:=nav2;
    end;
  ni_typ:= round(fsb/fgen/2);
  fre_dinSB:= fgen div nav;
  ni_max:= round(1.5*fsb/fgen/2); // must be 172 digits in positive pulse
  ni_imp:= fsb div fgen div 2 - spoiled*2;
end;

procedure TForm1.UOClick(Sender: TObject);
begin
  if UO.ItemIndex=0 then
    begin
      vaga_st:=(vaga_st-nul_lin)*diskr_din;
      vaga_rid:=(vaga_rid-nul_lin)*diskr_din;
    end
  else begin
      vaga_st:=vaga_st/diskr_din+nul_lin;
      vaga_rid:=vaga_rid/diskr_din+nul_lin;
    end;
end;
end.

```