

УДК 550.832

Ю. А. Денисов, М. Г. Буяльский,  
М. М. Наваркина, А. П. Яковлев

## ПРОГРАММНО-АППАРАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС “ГЛУБИНОМЕР”. ИСТОРИЯ РАЗРАБОТКИ И ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Рассмотрена история развития отдельных систем, входящих в состав комплекса “Глубиномер”. Приведены сведения об обработке результатов регистрации и программного обеспечения.

*Ключевые слова:* каротаж, автономные приборы, глубиномер, буровой инструмент.

По мнению авторов, описание процесса развития комплекса “Глубиномер” позволяет лучше оценить, что можно ожидать в дальнейшем от его использования.

Разработка глубиномера начата в 2000 г., и представления, каким быть измерительному комплексу, на тот момент были достаточно смутными. Подробнее об этом можно ознакомиться в [1], где приведены анализ подъема бурового инструмента и сравнительный анализ возможных способов измерения перемещения бурового инструмента. Там же дано описание принципа действия глубиномера, заключающегося в том, что на компьютере во времени регистрируются перемещение талевого блока и натяжение силового талевого каната. На основе этих данных вычисляется перемещение автономных скважинных геофизических приборов, закрепленных внизу бурового инструмента.

### Этапы развития электропривода глубиномера

В качестве прототипа схемы электромеханической рулетки (ЭМР) глубиномера был выбран катушечный магнитофон. Измерительный канал наматывался “в навал” на накопительный барабан через редуктор, соединенный с двигателем подмотки. Далее канал выходил на натяжной (подпружиненный) ролик, затем на измерительный и обводной ролики. Использовался двигатель постоянного тока, коллекторный, последовательного возбуждения, напряжением 27 В, ток 15 А. Схема питания – от 220 В, через понижающий трансформатор,

напряжение звена постоянного тока 30 В, далее ключевой регулятор (верхний ключ, диод на землю, дроссель) с обратной связью по току и натяжному ролику. Преобразователь питания находился непосредственно в ЭМР. То есть достаточно опасное напряжение 220 В подводилось к устью скважины, где должна была располагаться ЭМР.

При размотке двигатель оказывался в генераторном режиме. После регистрации основного интервала записи подъем инструмента был переведен с первой скорости на вторую. При большей скорости, как было выявлено при использовании, возникал ток короткого замыкания через силовой диод. Усилие натяжения становилось неконтролируемо большим. Измерительный канат проваливался между витками в накопительном барабане и заклинивал. Несмотря на солидный вес (110 кг) ЭМР была поднята тальблоком на высоту 1 м. Работу пришлось прервать, благо основной интервал каротажа уже был зарегистрирован.

Для решения проблемы короткого замыкания (КЗ) и для облегчения ЭМР силовую схему питания двигателя перенесли от ЭМР в помещение персонала, соединив с двигателем проводом длиной 30 м, тем самым увеличив сопротивление пути короткого замыкания.

С весом и габаритами ЭМР соглашаться было никак нельзя, и во второй версии ЭМР удалось путем переработки конструкции почти вдвое уменьшить ее вес (до 60 кг) и соответственно габариты.

Тяговое усилие на измерительном канате, когда скорость намотки небольшая, составляло около 5 кг. При сильном ветре измерительный канат отклонялся настолько, что появилась необходимость посчитать погрешность от ветра.

Ограничимся приближенным расчетом и для упрощения примем, что ветер по всей высоте измерительного каната равномерный (нет увеличения скорости по высоте). Это позволяет считать, что под действием ветра измерительный канат отклонится по цепной линии. Цель расчета – выяснить, какой скорости допустим ветер, чтобы удлинение не превысило 0,1%.

Длину цепной линии [4] определяем по формуле

$$dl = L - l = \frac{q^2 l^2}{24H^2},$$

$$0,001 \cdot l = \frac{q^2 l^2}{24H^2},$$

$$q = 0,04 \text{ кг/м} \approx 0,4 \text{ Н/м},$$

где  $H$  – натяжение каната при начальной температуре,  $\text{кг}$ ;  $q$  – нагрузка, приходящаяся на единицу длины каната при начальной температуре,  $\text{кг/м}$ ;  $L$  – длина каната,  $\text{м}$ ;  $l$  – расстояние между крайними точками.

Площадь погонного метра измерительного каната диаметром 2  $\text{мм}$  составляет 0,002  $\text{м}^2$ .

Давление ветра на погонный метр каната можно рассчитать по следующей формуле:

$$P = F/S = 0,4/0,002 = 200 \text{ Па.}$$

Используя рекомендации ГОСТ [2] по расчету, получим, что при диаметре измерительного каната 2  $\text{мм}$ , натяжке 10  $\text{кг}$ , длине свечи 40  $\text{м}$ , при условии удлинения на 0,1% (за счет парусности) допустимая скорость ветра составит 16  $\text{м/с}$ .

Поскольку на буровой есть затеняющие ветер конструкции, это повышает допустимую скорость ветра. Более короткие свечи также позволяют пренебречь и более сильным ветром.

Еще одной причиной отказа от коллекторного двигателя является щеточный аппарат. Кроме того, что щетки изнашиваются и требуют обслуживания и замены, они еще вносят дополнительные потери трения, а самое нежелательное – есть возможность искрения, что весьма пожароопасно.

В 2006 г. при разработке следующего варианта ЭМР были выбраны безщеточные двигатели и учтена ветровая нагрузка на измерительный канат. В результате был выбран асинхронный двигатель АИР63 В4 (1500 об/мин, 0,37 кВт, масса 5,6 кг, с частотным преобразователем). Передаточное отношение было уменьшено до 4 (поликлиновый ремень).

По результатам испытаний на буровой (Томск, 2008) пришлось вновь подбирать двигатель для модификации ЭМР. В промышленности стал более доступным вентильный двигатель с постоянными магнитами, более легкий (масса 2 кг) и компактный ( $D = 100$ ,  $h = 50 \text{ мм}$ ). Большое количество полюсов обусловило высокий крутящий момент и приемлемую скорость. Характеристики двигателя позволили исключить редуктор, соединив измерительный барабан напрямую с двигателем.

Для обеспечения достаточно стабильного натяжения измерительного каната в алгоритме управления учитывались направление вращения, сила трения, скорость, ускорение, температура, а также подбирались значения регулировочных коэффициентов по разным параметрам и в разных режимах.

На рис. 1 приведена электрическая функциональная схема устройства.



Рис. 1. Схема электрическая функциональная

Пульт глубиномера (ПГ) — это пульт контроля каротажа, упрощенный до преобразователя интерфейса (USB – RS485) и преобразователя питания (с ~220 В до 48 В) в уменьшенном кейсе.

В ЭМР на одном микроконтроллере (МК) осуществлены обмен с компьютером (RS-485), управление двигателем, оцифровка аналоговых сигналов датчика температуры двигателя, концевого датчика и натяжения каната, ведение реального времени (для привязки данных) и хранение калибровочной информации в энергонезависимой памяти.

МК также ведет подсчет изменения длины измерительного каната по сигналам углового положения двигателя (датчики Холла). Отказавшись от ранее используемого оптического датчика перемещения, авторы упростили и облегчили ЭМР.

Концевой датчик служит для плавного отключения двигателя в конце намотки и для привязки абсолютного значения длины измерительного каната, поскольку датчик перемещения инкрементальный, а не абсолютный.

## Измерение натяжения

В первом варианте для измерения натяжения был применен датчик ДНК-311-06 [5] весом ~25 кг. Поскольку условия монтажа на “мертвый” конец бывают весьма затруднительными, в дальнейшем был разработан более легкий электропреобразователь натяжения (ПН) [6].

Для измерения натяжения при монтаже ПН талевый канат изгибается. При натяжении каната получаем боковую силу, изгибающую чувствительный элемент ПН – плоскую пружину.

Деформация плоской пружины вызывает перемещение магнита относительно магниточувствительной микросхемы. В первом варианте при увеличении натяжения силового каната микросхема приближалась к магниту.

У этого варианта обнаружился недостаток: при превышении некоторой нагрузки микросхема приближалась к магниту настолько, что входила в насыщение, и дальнейшее повышение натяжения не вызывало увеличения напряжения с выхода микросхемы. Для устранения этого недостатка была изменена схема: при увеличении натяжения микросхема отдалась от магнита. В этом случае насыщения не происходило, и при регистрации кривая натяжения более соответствовала характеру изменения физической величины.

Поскольку это преобразователь натяжения, а не датчик, то сертификации не требуется и требования к устройству менее строгие, чем к датчику, что удешевляет конструкцию без потери функциональности. Для определения начала и конца движения бурового инструмента достаточно единиц АЦП.

## Программное обеспечение

В работе [1] были описаны следующие основные функции, возложенные на прикладное программное обеспечение (ПО):

- проведение тестирования устройства;
- ведение регистрации и визуализации измеряемых и вычисляемых параметров “Глубиномера А1Т” при движении буровой колонны;
- проведение обработки данных регистрации для получения файла “время–глубина”, который будет использован для привязки данных каротажа к глубине.

Первые две функции были реализованы в рамках программного обеспечения для обслуживания автономных приборов в среде MS-DOS.

Третья функция реализована в виде отдельной программы в среде Windows.

За последующие 7 лет эксплуатации глубиномера был накоплен соответствующий опыт, что отразилось на расширении функций и возможностей пакета ПО.

К функциям тестирования добавилась функция проведения периодических калибровок. Необходимость в метрологическом обеспечении возникла для учета износа узлов ЭМР в процессе эксплуатации.

К упомянутым ранее функциям регистрации были добавлены и реализованы следующие требования:

- оперативная оценка текущей глубины каротажа;
- подсчет количества поднятых/опущенных свечей бурильной колонны;
- оценка длины текущей свечи.

Кроме того, при проведении работ важным является соблюдение допустимой скорости каротажа, превышение которой может привести не только к ухудшению качества скважинных данных, но и к выходу из строя скважинной аппаратуры. В связи с этим ПО должно осуществлять контроль превышения скорости и сигнализировать об этом оператору.

Данные требования создают необходимые условия для контроля качества проводимых работ в целом.

Все первичные данные в неизмененном виде регистрируются в файл для дальнейшей обработки уже после проведения каротажа. Расчеты в процессе каротажа для отображения текущих данных производятся по упрощенным алгоритмам, в то время как расчет глубин при обработке производится по более сложным алгоритмам заново, с применением множества внешних ручных регулировок и параметров в случае необходимости. Осуществляется также контроль качества первичных данных.

ПО должно обеспечивать точное определение интервалов движения по данным двух имеющихся датчиков без использования результатов от дополнительных устройств (например, того же датчика клиньев).

Должен осуществляться подсчет числа свеч и глубин, в том числе и при смене направления движения инструмента. Смена направления движения может происходить, например, при необходимости записи повтора на исследуемом интервале при возникновении затруднений движению (требующих "расхаживания" бурового инструмента). Кроме

того, смена направления движения в процессе регистрации связана со спецификой технологии проведения работ глубиномером.

Исходя из опыта использования, в данную технологию проведения работ внесено требование начинать регистрацию не непосредственно с забоя (или с подошвы исследуемого интервала), а на спуске, как минимум за 2–3 свечи до начала подъема инструмента. Это обусловлено в первую очередь безопасностью (вероятность прихвата на забое выше, чем на отдалении от него). К тому же зачастую на забое имеем неполную свечу и присоединить измерительный канат к талевому блоку в этом случае невозможно.

В связи с этим в программу обработки заложен механизм автоматической разбивки на интервалы движения с возможностью обработки и получения данных как поинтервально, так и целиком. Например, при записи повтора отсутствует необходимость вмешательства оператора в данный процесс на этапе регистрации, не надо запоминать на какой свече и в какое время началась и закончилась повторная запись. На этапе обработки данных участок, соответствующий повтору, будет наглядно представлен. Достаточно лишь выбрать из получившегося списка нужный интервал для получения соответствующего файла “время–глубина” (рис. 2).

Кроме смены направления движения на длительные интервалы, часто встречаются кратковременные смены направления движения (менее длины одной свечи), которые могут существенно осложнить обработку материала. Частые смены направления движения происходят при “нащупывании” забоя буровым инструментом (скважинной аппаратурой), при “расхаживании” инструмента в случае прихвата и в некоторых других ситуациях.

Алгоритмы, включенные в методику обработки данных глубиномера, позволяют достаточно точно измерять глубину на подобных “сложных” интервалах, вручную или автоматически убирать ненужные интервалы движения, так называемые “петли”.

Следует отметить, что хоть сколько-нибудь точный расчет глубин “вручную”, без использования глубиномера, например с использованием промера бурового инструмента, при возникновении подобных ситуаций становится практически невозможным.

Одной из наиболее сложных задач при обработке данных является точное определение начала и окончания движения бурового инструмента. ЭМР отслеживает перемещение талевого блока, но кроме этого

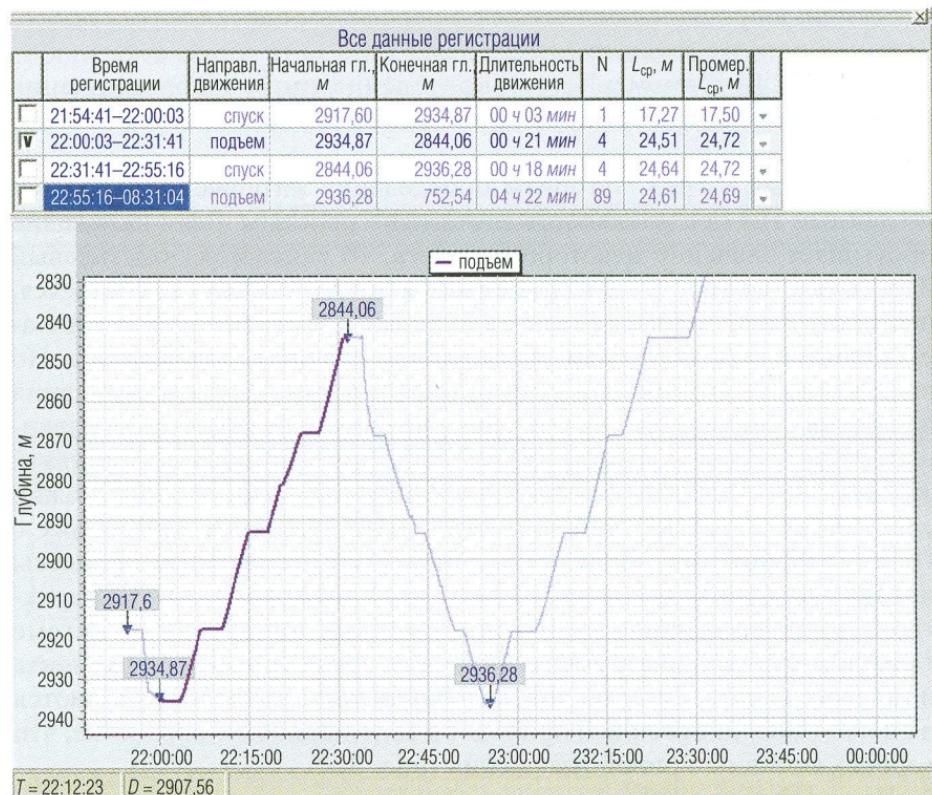


Рис. 2. Результат автоматической разбивки данных регистрации глубиномера. Выделено четыре интервала – спуск, подъем, спуск, подъем. Для текущей обработки выбран второй интервал

необходимо также знать, когда его перемещение связано с перемещением бурового инструмента. В первых вариантах глубиномера этот вопрос решался при помощи датчика клиньев и датчика натяжения.

Функция датчика клиньев – определить, находится ли буровой инструмент на клиньях или висит на талевом блоке. Все перемещения талевого блока, зафиксированные ЭМР, которые происходят при первом условии, считаются холостыми и в расчет не берутся. Если по показаниям датчика клиньев видно, что клинья сняты, то перемещения талевого блока принимаются за перемещения инструмента и считаются его рабочим ходом.

Датчик клиньев использовался в первых вариантах глубиномера. Затем от датчика клиньев отказались.

В ПАК “Глубиномер” для определения интервалов движения используются только данные преобразователя натяжения силового каната.

На первый взгляд, алгоритм определения интервалов движения по данным ПН представляется достаточно простым. Если натяжение превышает значение некоторого порога, то считается, что талевый блок движется вместе с инструментом, в противном случае считается, что инструмент зафиксирован на клиньях и талевый блок совершаet холостой ход, например за очередной свечой с подсвечника. Но вся сложность возникает в точном определении начала и окончания движения. Процесс снятия и посадки на клинья не является мгновенным и растянут во времени. Цикл “движение – стоянка на клиньях” в реальности выглядит достаточно сложно. Представить его можно следующим образом: “рабочий ход – ПП1 – стоянка на клиньях – ПП2 – рабочий ход”. Здесь ПП1, ПП2 – это переходные процессы посадки на клинья и снятия с клиньев. Данные фазы работы характеризуются возникновением колебательных процессов в системе тальблок–буровой инструмент из-за упругости бурового инструмента и талевого каната. Естественно, колебательные процессы отражаются на показаниях натяжения и приводят к затруднениям в обработке, что хорошо видно на кривой натяжения (рис. 3).

На рис. 3 видно, что определение начала и окончания движения по кривой натяжения затруднительно. Ситуация усугубляется при снижении общего веса колонны на подъеме. В этом случае вес колонны стремится к весу одной свечи. На каком-то этапе задача определения интервалов холостой ход/рабочий ход ( $XX/PX$ ) талевого блока становится трудноразрешимой для программы (без адекватной фильтрации) и может потребоваться участие оператора. Происходит сбой подсчета числа свечей. Однако глубина большинства исследуемых разрезов такова, что вес буровой колонны на интервале каротажа достаточный (рис. 4). К тому же соотношение сигнал/шум в данном случае улучшается не только за счет увеличения амплитуды сигнала ПН, но и уменьшения амплитуды шумов вследствие изменения характеристики колебательной системы из-за увеличения веса колонны. Тем не менее постоянное изменение показаний преобразователя натяжения, в зависимости от длины буровой колонны, потребовало ввести соот-

ветствующий алгоритм, основанный на использовании динамического порога натяжения. При этом уровень дискриминации шумов также рассчитывался с учетом изменения веса колонны. Кроме этого, для снижения уровня шумов должна применяться фильтрация кривой ПН.

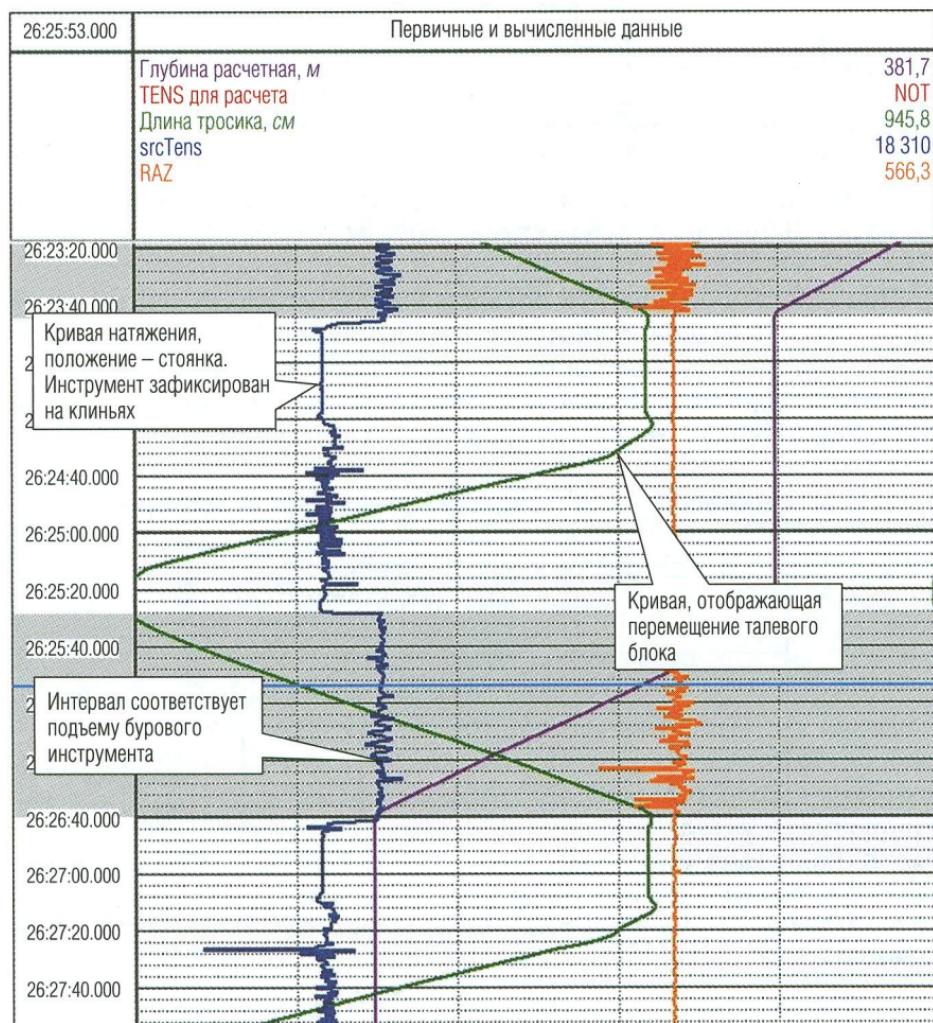


Рис. 3. Показания натяжения на интервалах движения и стоянки (отличаются между собой практически на уровне шумов)

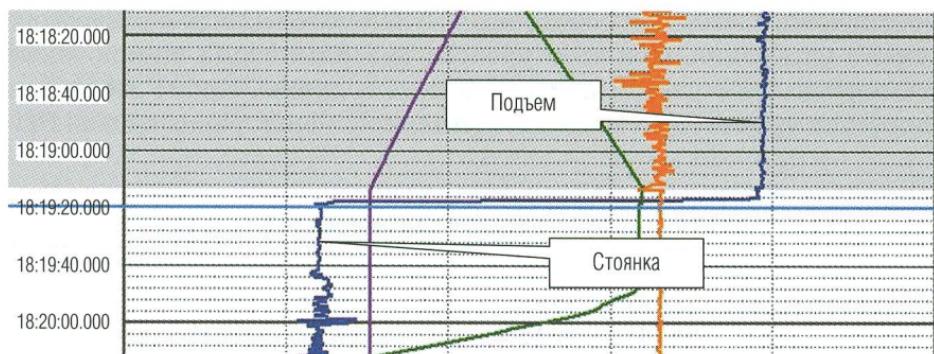


Рис. 4. Возрастание натяжения силового каната с ростом глубины (масштаб как на рис. 3; глубина в первом случае 380 м, во втором – 2760 м)

При уточнении момента посадки на клинья может учитываться характерное изменение значения натяжения и длины троса в комплексе. Данный уточняющий алгоритм был разработан на основе анализа поведения кривой перемещения талевого блока и показаний ПН на переходных процессах (рис. 5).

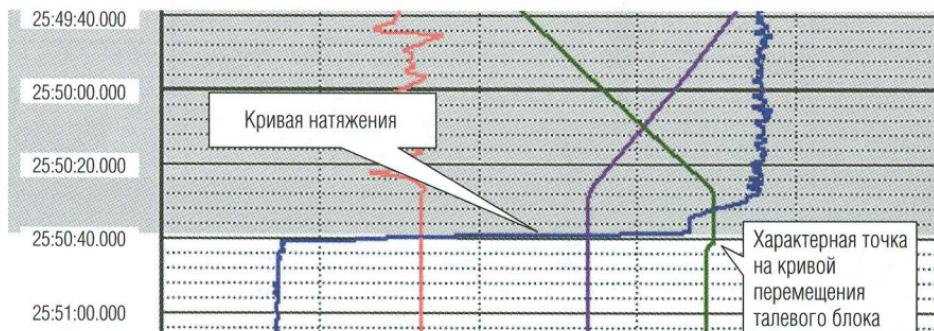


Рис. 5. Диаграмма кривой натяжения. Серым цветом выделен интервал движения, белым – стоянка. Окончание интервала движения определено по показаниям ПН с учетом характерных точек на кривой перемещения талевого блока

Если какой-либо интервал движения все же был определен неверно и значение расчетной длины свечи вызывает сомнения, то допускается установка границ интервала вручную.

Еще одной проблемой при привязке скважинных данных к данным глубиномера является возникновение временной задержки между началом движения бурильной колонны “наверху”, в том самом месте, где она измеряется глубиномером, и началом движения скважинных приборов “внизу”, в том месте, где пишутся регистрируемые данные, которые впоследствии надо привязывать к глубине.

Значение данной задержки – величина непостоянная и зависит от множества факторов. Причиной задержки является растяжение инструмента, которое в свою очередь зависит от его длины и веса, сил трения, возникающих вследствие прижима бурового инструмента к стенке скважины, величина которых также зависит от угла наклона ствола скважины.

Данная задержка движения, передаваемого “сверху вниз”, может оказаться достаточно большой и достигать нескольких десятков секунд. Если задержку движения не учитывать, то при формировании файла скважинных данных по глубине появится брак (рис. 6).

Началу очередного интервала движения будут соответствовать данные с фактической стоянки прибора, а часть данных прибора, соответствующая последним секундам подъема, напротив, будет утеряна.

В связи с этим в программе обработки предусмотрена коррекция начальных и конечных времен движения по скважинной кривой. В качестве кривой для коррекции удобно использовать данные акселерометров, аппаратуры АК и др. В файл данных глубиномера импортируется требуемая кривая для коррекции, и программа автоматически для каждой свечи (интервала движения) определяет смещение по времени. Данные файла время–глубина рассчитываются уже с учетом результатов определения смещений (рис. 7).

Практически всегда у буровой бригады имеется мера бурового инструмента, часто в электронном виде и в упорядоченной последовательности, соответствующей спуску. Эти данные являются полезной информацией для осуществления контроля качества полученного материала.

В случае, если по какой-либо причине (метрология, неверно заданные входные параметры, несоответствие условий работ и т. п.) значения промера расходятся с данными глубиномера, ПО позволяет заменить длины свечей данными промера как каждую по отдельности, так и все вместе. При возникновении систематической ошибки, например неправильно выполненной калибровке, можно нормировать промер на среднюю длину свечи.

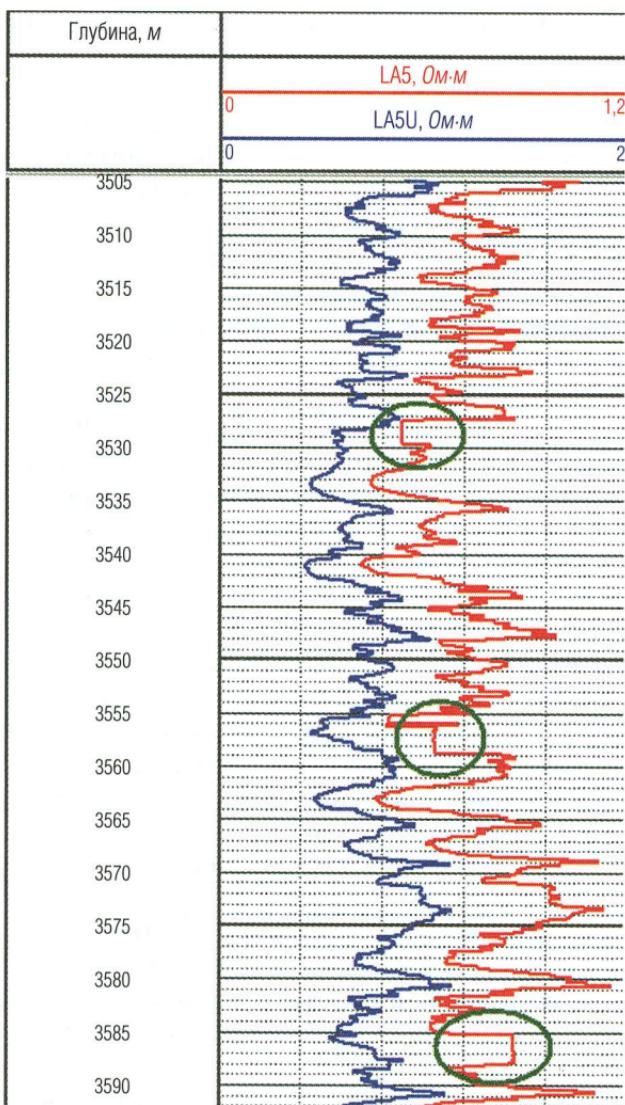


Рис. 6. Пример бракованной записи. Изображены кривые сопротивления зонда БК-5 скважинного прибора БК-3/5 (для удобства в разных масштабах). Кривая красного цвета привязана к глубине по данным глубинометра без использования коррекции на задержку движения. Зеленым цветом выделены интервалы стоянок, ошибочно принятые за интервалы движения. Синяя кривая привязана к глубине уже с учетом коррекции. На ней стоянок нет

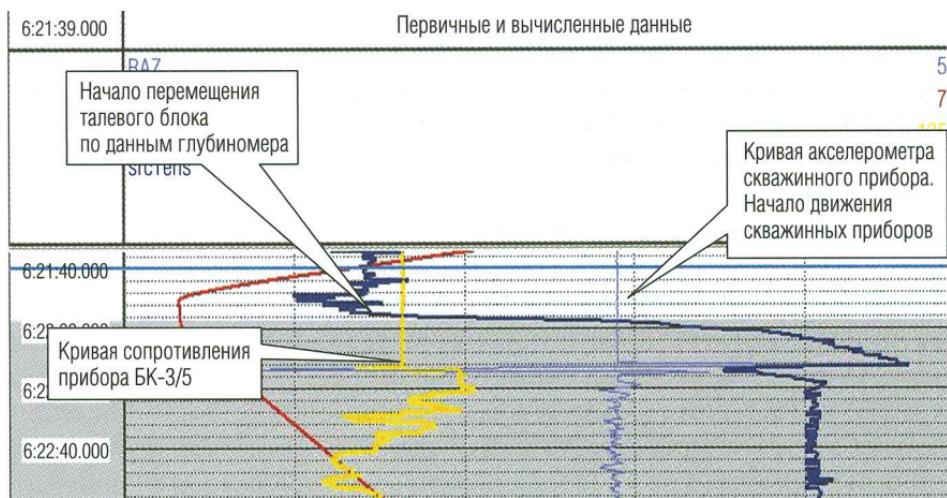


Рис. 7. Пример введения поправок за смещение. Хорошо видно, что начало движения скважинных приборов на несколько секунд отстает от начала движения талевого блока

## Выводы

История разработки комплекса ПАК за неполные тринадцать лет позволяет получить представление о накопленном опыте и приобретенной квалификации в изготовлении инструмента измерения глубины, обработке материалов регистрации и обучении пользователей.

Разработка и усовершенствование глубиномера не останавливается, поскольку при работе с ним открываются новые пути повышения следующих показателей:

- точность (постепенно увеличивается количество учитываемых факторов);
- надежность (выявляются ситуации, в которых допускались сбои, и вносятся поправки в соответствующие модули аппаратной и программной части);
- удобство (уменьшение веса, перекладывание некоторых функций с персонала на оборудование и программы).

Необходимо отметить, что многое осталось “за кадром”: развитие механической части ЭМР, интерфейс ЭМР с компьютером, ПО с пользователем, алгоритмы управления двигателем и др.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Власенко П. И., Денисов Ю. А., Яковлев А. П. Измерительный комплекс “Глубиномер А1Т” для привязки данных от автономных приборов к глубине // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2005. Вып. 5–6 (132–133). С. 221–229.
2. ГОСТ 1451-77. Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения.
3. Контактные сети и линии электропередач. Изд. “Маршрут”, 2003. 416 с.
4. <http://scbist.com/scb/uploaded/kontaktnaya-set/6.htm>.
5. <http://gelstver.ru/catalog/stancijageologotekhnologicheskikhissledovanijsi/dnk>.
6. [http://karotazh.ru/sites/default/files/files/glubinomer\(2\).pdf](http://karotazh.ru/sites/default/files/files/glubinomer(2).pdf).

УДК 550.832

*М. А. Юматов, А. А. Веселков, А. Ю. Юматов, С. А. Стрельцов*

## **НАЗЕМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СКВАЖИНАХ. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ**

Рассмотрена краткая история развития разработок специалистов ООО “Нефтегазгеофизика” в области наземного оборудования геофизических исследований скважин. Приведены описания структуры реализованных на практике вариантов каротажных регистраторов. Основное внимание уделено разработке нового поколения систем сбора каротажных данных.

*Ключевые слова:* каротаж, система сбора данных, регистрация, декодирование.

За последние несколько лет современная электронная база претерпела ряд значительных изменений. Миниатюризация основных электронных компонентов затронула все без исключения области, где хоть как-то применяется цифровая техника. Не остается в стороне и измерительное оборудование для геофизических исследований скважин, как наземное, так и скважинное. То, что еще вчера казалось единственным возможным и оправданным техническим решением,