

30X

МИНИСТЕРСТВО ВЫШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
С С С Р  
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Л Я Х Николай Ефимович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ  
И АППАРАТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РАЗВЕЛОЧНОГО  
БУРЕНИЯ

Специальность 05.13.05 - "Элементы и технические  
средства управления и регулирования"

Автореферат диссертации,  
представленной на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск - 1975

Диссертационная работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола и научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте открытых горных работ /НИИОГР/.

Научные руководители:

кандидат технических наук, доцент Н.А.Зубцов;

кандидат технических наук, старший научный

сотрудник Р.Х.Гафиятуллин.

Официальные оппоненты:

заслуженный деятель науки и техники РСФСР,

доктор технических наук, профессор Г.С.Черноруцкий;

кандидат технических наук, старший научный

сотрудник В.М.Питерский.

Ведущее предприятие - экспедиция "Уралуглеразведка"  
/г. Челябинск/.

Автореферат разослан " " 1975 г.

Защита диссертации состоится " " 1975 г.  
на заседании Ученого Совета энергетического и приборостроительного факультета Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола /пр.Ленина, 76, конференцзал/.

Просим Вас принять участие в заседании Совета или прислать  
отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 454044,  
г.Челябинск, пр.Ленина, 76, Челябинский политехнический институт.

С содержанием диссертации можно ознакомиться в библиотеке  
института.

Ученый секретарь Совета  
кандидат технических наук, доцент М.А. Д.А.Короленко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Непрерывное возрастание потребностей промышленности в минеральном сырье требует значительного увеличения объема разведочного бурения. Затраты средств на бурение достигают 35% от общей стоимости геологоразведочных работ. Повышение эффективности процесса бурения имеет большое народно-хозяйственное значение, и эти вопросы нашли отражение в директивах XXIV съезда КПСС.

Эффективность разведочного бурения в значительной степени связана с совершенствованием технологии бурения скважин и применением автоматических устройств.

Эксплуатация буровых станков показывает, что изрезла необходимость разработки такой системы управления, которая бы гарантировала правильность ведения процесса бурения независимо от индивидуальных особенностей бурового мастера. Для разведочного бурения характерна сравнительно высокая перемежаемость горных пород, носящая случайный характер. В таких условиях нахождение и поддержание на оптимальном уровне хотя бы двух режимных параметров бурения, например, осевой нагрузки и частоты вращения инструмента, весьма сложны.

Цель и задачи исследований. Целью проведенных исследований является повышение эффективности буровых работ и облегчение труда обслуживающего персонала путем совершенствования систем контроля, регулирования и управления технологическим процессом бурения.

В рамках сформулированной цели поставлены следующие задачи:

1) на основе изучения технологических аспектов процесса разведочного бурения выбрать и обосновать (или разработать) критерии оптимизации процесса бурения;

2) исследовать основные соотношения, характеризующие взаимосвязь оптимальных параметров режима бурения;

3) разработать принципы построения системы управления процессом бурения;

4) разработать и исследовать основные контролирующие, регулирующие и управляющие узлы системы;

5) провести экспериментальные исследования разработанных устройств в условиях лаборатории и производства.

Методы исследований. В соответствии с поставленной целью, отражающей принцип единства технологии, информации, регулирования и управления, исследования носили комплексный характер и включали следующие методы:

- 1) обобщение и анализ теоретических и экспериментальных исследований, посвященных установлению качественных и количественных связей между основными параметрами процесса бурения;
- 2) аналитические исследования, посвященные критериям оптимизации, сопровождающиеся расчетами на ЭЦВМ;
- 3) лабораторные исследования элементов и устройств систем регулирования и управления;
- 4) экспериментальные натурные исследования с целью испытания устройств контроля, регулирования и управления в условиях производства и их внедрение в опытно-промышленную эксплуатацию.

Научная новизна. Для бурения твердоуплавным затупляющимся инструментом предложен критерий минимального времени проходки скважины ( $T$ -критерий) и квазиоптимальный критерий постоянных проходок ( $t_c$ -критерий). Рассмотрены стоимостные критерии оптимизации - модификации  $T$ -критерия и  $t_c$ -критерия, произведено сравнение различных критериев между собой. Получены основные соотношения между оптимальными параметрами, осевой нагрузкой и частотой вращения породоразрушающего инструмента, на основе которых предложены принципы построения двухканальной системы управления процессом бурения. Предложен ряд технических устройств на уровне изобретений.

Практическая ценность. Разработанный  $T$ -критерий может быть использован как эталонный для оценки эффективности и корректности других критериев. Квазиоптимальный  $t_c$ -критерий, удобный в инженерной практике, эффективен при небольших и средних глубинах бурения и сравнительно некрепких и малоабразивных породах. Проведенные теоретические исследования критериев оптимизации позволили обосновать принципы построения системы автоматического управления процессом разведочного бурения твердоуплавным породоразрушающим инструментом. Приведены алгоритмы и программы машинного расчета времени (стоимости) бурения скважины.

Реализация работы в промышленности. Разработанная двухканальная система регулирования и управления процессом бурения, а также контрольно-измерительная аппаратура внедрены в производство в Ключевской ГРП экспедиции "Уралуглеразведка". Годовой экономический эффект от внедрения разработанного комплекса аппаратуры сост-

тавил порядка 8 тыс.руб. в год на один буровой станок.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- XXII-XXVII научно-технических конференциях Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола 1971-1975 г.г.;
- расширенном техсовете треста "Уралшахтогеология" в 1972 г., экспедиции "Уралуглеразведка" в 1975 г.;
- первой научно-технической конференции молодых ученых Урала (г.Свердловск, 1972 г.);
- III Уральской научно-практической конференции по метрологии (г.Челябинск, 1974 г.);
- Всероссийской конференции по измерительно-информационным системам "ИИС-73" (г.Ивано-Франковск, 1973 г.).

Публикации по материалам диссертации. Опубликовано всего 16 работ, в том числе один проспект ВДНХ и 5 авторских свидетельств.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 146 страниц машинописного текста, библиографию (112 наименований), 65 рисунков и приложения на 61 страницах.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ

Буровой процесс как объект управления является многосвязной системой, состояние которой в каждый момент времени характеризуется его фазовыми координатами: механической скоростью бурения  $V$ , значением проходки в рейсе  $h$ , показателем часовой скорости износа затупляющегося инструмента  $K$ , интенсивностью линейного износа коронок самозатачивающегося типа во времени  $\ell_u$ , являющимися следствием воздействия осевой нагрузки  $P$ , окружной скорости вращения  $U$  и ряда других факторов. Сложность процесса бурения и многообразие способов бурения, применяемого породоразрушающего инструмента, видов силового привода и глубин бурения налагаются определенные трудности в проектировании систем автоматического управления процессом бурения САУПЕ.

Исследованиям в области техники и технологии вращательного механического бурения посвящены многие работы советских ученых Ф.А.Шамшева, Е.И.Воздвиженского, С.А.Волкова, В.С.Владиславцева,

Е.Ф.Эпштейна и др., в области моделирования и автоматизации работы Е.А.Козловского, Г.С.Черноруцкого, В.А.Цыганкова, А.Е.Тропа, Р.Х.Гафиятуллина, И.П.Петрова, Н.И.Терехова, В.М.Питерского и др., в области разработок измерительной и регулирующей аппаратуры М.Г.Эскина, А.А.Минина, Э.А.Вольгемута, А.А.Погарского, М.М.Майорова, В.Б.Гинзбурга, В.Я.Симкина, О.П.Леонтьева и др.

Значительное число работ указанных исследователей посвящено глубокому бурению на нефть и газ и шарошечному бурению взрывных скважин. Вопросами автоматизации и оптимизации разведочного бурения занимается в настоящее время сравнительно узкий круг специалистов, среди которых следует отметить Е.А.Козловского, Р.Х.Гафиятуллина, Н.И.Терехова.

В результате анализа публикаций по оптимизации процесса разведочного бурения выделены восемь типов САУПЕ, выявлены особенности каждой из систем, охарактеризованы достоинства и недостатки, определены основные задачи, требующие решения при синтезе САУПЕ. К таким задачам, в первую очередь, следует отнести: 1) создание регулируемого привода САРУ; 2) создание системы подачи породоразрушающего инструмента САРР; 3) выбор (разработку) критериев оптимизации процесса разведочного бурения твердосплавным инструментом; 4) выбор (разработку) необходимой контрольно-измерительной аппаратуры, программных устройств, экстремальных регуляторов.

В НИИОГРе (при участии автора) разработана двухканальная система регулирования<sup>X</sup>, которая обеспечивает раздельное управление частотой вращения бурового инструмента и осевой нагрузкой при свободной подаче. Система может быть использована и в качестве автономного устройства, измеряющего усилие на крюке, осевую нагрузку и частоту вращения, в качестве контролирующего устройства о перегрузках по весу, осевой нагрузке и моменту в верхней части колонны, а также в качестве исполнительных органов системы оптимизации процесса разведочного бурения.

Первый канал системы представляет частотно-импульсную систему стабилизации осевой нагрузки, второй канал — тиристорный привод постоянного тока с двухзонным регулированием. Благодаря разработке таких устройств появляется возможность переходить к созданию системы оптимизации.

<sup>X</sup> Система экспонировалась на ВДНХ /Научно-техническое творчество исследований НТИМ-74/, авторы удостоены дипломов лауреатов выставки.

На основе анализа работ по технологии бурения в дальнейших исследованиях использована следующая математическая модель процесса бурения твердосплавным породоразрушающим инструментом:

а) зависимость скорости бурения от изменения параметров  $P$  и  $V$

$$V = B \gamma(P) V^{\xi},$$

/1/

где  $B$  - коэффициент, учитывающий буримость породы при заданном типе породоразрушающего инструмента и показателях промывки;

$\xi$  - показатель, определяющий характер изменения механической скорости бурения от изменения окружной скорости  $V$ ;

$\gamma(P)$  - нелинейная зависимость, представленная в общем виде, характеризующая изменение  $V$  при изменении  $P$ ;

б) скорость бурения для затупляющегося инструмента от начала рейса к концу рейса изменяется по закону естественного износа, описываемого выражением

$$V = V_0 e^{-kt},$$

/2/

где  $t$  - время чистого бурения;

$V_0$  - начальная скорость бурения;

$k$  - коэффициент интенсивности падения скорости бурения во времени;

в) коэффициент  $k$  может быть представлен в виде

$$k = A_1 P^{\alpha_1} V^{\beta_1},$$

/3/

где  $A_1$  - коэффициент пропорциональности;

$\alpha_1, \beta_1$  - показатели степени,  $\alpha_1 \geq 1, \beta_1 \geq 1$ ;

г) скорость бурения во времени незатупляющимся (самозатачивающимся) инструментом

$$V(t) = \text{const},$$

/4/

д) интенсивность  $i_u$  линейного износа резцов во времени характеризуется соотношением

$$i_u = A_2 P^{\alpha_2} V^{\beta_2},$$

/5/

где  $A_2, \alpha_2, \beta_2$  - эмпирические коэффициенты и показатели, зависящие от свойств породы, инструмента, промывочного агента.

Данная модель процесса бурения позволяет разработать критерии оптимизации, отражающие технико-экономические показатели процесса бурения.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ

При разработке системы управления процессом бурения прежде всего требуется выбрать или разработать критерий оптимизации, который бы удовлетворял технико-экономическим требованиям производства. Немаловажное значение при выборе критерия имеет его практическая осуществимость в проектируемой системе управления.

Необходимым условием достижения максимальной производительности по скважине является минимизация времени проходки, т.е. необходима такая стратегия проходки, при которой затраты времени будут минимальными  $\min(T_{pr} + T_h) = T_{min}$ , где  $T_{pr}$ ,  $T_h$  - производительное и непроизводительное время при проходке скважины.

Если предположить, что время  $T_{pr}$  и  $T_h$  некоррелированы между собой, то

$$T_{min} = \min T_{pr} + \min T_h.$$

Фактически коэффициент корреляции  $\gamma_k$  больше нуля, т.к. при сокращении  $T_{pr}$  уменьшается суммарное время  $T_h$ , и в этом случае

$$T_{min}^* = \min T_{pr}^* + \min T_h^* - \gamma_k \Delta T_{pr},$$

где  $\Delta T_{pr} = \min T_{pr} - \min T_{pr}^*$  - сокращение производительного времени за счет использования новой техники либо оптимальных режимов у существующего оборудования.

Минимизация производительного времени бурения ведет к общему сокращению расходов времени на бурение скважины. В работе показано, что с точки зрения управления процессом бурения можно в одинаковой мере пользоваться критериями максимума производительности по скважине, минимума производительного времени и максимума средней рейсовой скорости по скважине при минимизированном времени непроизводительных работ.

Выбирая критерий рейсовой скорости полагают, что достижение его максимума в каждом рейсе связано с наиболее быстрым углублением скважины, а следовательно, и с наименьшим временем проходки скважины. Нами далее показано, что критерий  $V_{rmax}$  не является

глобальным. В связи с этим предложен критерий минимума времени проходки скважины, названный  $T$ -критерием.

Конечной целью бурового процесса является достижение бурением снарядом проектной отметки  $H_{np}$  за наименьшее время при минимальных затратах на I м проходки. Исходя из исследований и практики известно, что одной программой движения трудно достичь сразу двух абсолютных минимумов времени и стоимости проходки скважины.

Так как стоимость одного метра проходки при твердооплавном бурении разведочных скважин определяется в основном затратами времени на бурение, а не стоимостью изнашивающихся частей инструмента ( $0,1+0,2$  руб/м), то возникает задача отыскания наилучшей программы, минимизирующей функционал

$$t_z = \Phi \{ \vec{h} [u(t), f(H), t] \}, \quad 16$$

где  $t_z$  - производительное время бурения скважины;

$\vec{h}$  - вектор с компонентами  $h_1, h_2, \dots, h_j, \dots, h_m$ ,

$h_j$  - проходка в  $j$ -том рейсе;

$u(t)$  - управляющие параметры;

$f(H)$  - физико-механические свойства пород по текущей глубине  $H$ .

При бурении однородных пород  $f(H) = const$  затупляющимся инструментом и, предполагая, что управляющие параметры  $u(t)$  заданы в течение рейса,

$$t_z = \sum_{i=1}^m \left[ -\frac{1}{K} \ln \left( 1 - \frac{h_i K}{V_o} \right) \right] + m t_o + \\ + \beta H_{np} + \alpha \sum_{i=1}^{m-1} (m-i) h_i + \frac{\alpha}{2} H_{np}, \quad 17/$$

где  $t_o$  - постоянное время спуско-подъемных операций в каждом рейсе;

$\alpha, \beta$  - усредненные коэффициенты, определяемые нормативами времени;

$m$  - необходимое число рейсов, при котором выполняется условие  $\sum_{i=1}^m h_i = H_{np}$ .

Для определения оптимальной стратегии проходки скважины по минимизации времени  $t_z$  использован метод неопределенных множителей Лагранжа  $\lambda$

$$\frac{\partial t_{\Sigma}}{\partial h_i} = \frac{1}{K} - \frac{1}{V_0/K - h_i} + \alpha(m-i) + \lambda = 0, \quad i=1, \dots, m. \quad /8/$$

Из системы /8/ получено рекуррентное соотношение, выражающее связь между значениями соседних проходок

$$h_{i+1} = \frac{V_0}{K} - \frac{1}{K\alpha} + \frac{\left(\frac{1}{K\alpha}\right)^2}{\frac{V_0}{K} + \frac{1}{K\alpha} - h_i}. \quad /9/$$

Используя /7/ и /8/ найдем

$$\sum_{i=1}^m \left( \frac{V_0}{K} + \frac{1}{K[\alpha(m-i)+\lambda]} \right) = H_{np}. \quad /10/$$

Из последнего соотношения для заданного числа рейсов определяется  $\lambda$ , затем находится из /8/ значение  $h_i$  и подсчитывается значение  $t_{\Sigma}$ . В работе дана методика выделения сравнительно узкого интервала чисел  $m_{min} \leq m \leq m_{max}$  на основе строгого доказательства.

Расчеты показали, что относительное значение первой проходки, соответствующей оптимальной стратегии проходки скважины, практически не зависит от значения  $V_0$  и глубины скважины  $H_{np}$ . Используя выявленную закономерность, показана возможность использования  $T$ -критерия в условиях изменения свойств горных пород от рейса к рейсу.

$T$ -критерий дает выигрыш по времени для любых начальных скоростей  $V_0$  и значений параметра  $K$  по сравнению с квазиоптимальным критерием  $V_{rmax}$ .

Нами предложен и исследован простой инженерный квазиоптимальный критерий постоянных проходок  $h_c$ , который позволяет получать близкие результаты к глобальному минимуму при малых интенсивностях износа инструмента и повышенных начальных скоростях бурения, где, как раз, критерий  $V_{rmax}$  не дает хорошего сближения с глобальным минимумом.

Производительное время проходки скважины по  $h_c$ -критерию определяется

$$t_{\Sigma h} = -m_h \frac{1}{K} \ln \left( 1 - \frac{H_{np} K}{m_h V_0} \right) + m_h t_o + \left( \frac{\alpha m_h}{2} + \beta \right) H_{np}, \quad /11/$$

где  $m_h$  - число рейсов согласно  $h_c$ -критерию.

Функция  $t_{zh} = \varphi(m_h)$  имеет минимум по числу рейсов при наложении ограничения  $m_h h_c \leq m_{hp}$ . Значение  $m_{hopt}$  определяется из уравнения  $dt_{zh}/dm_h = 0$  или иначе из

$$K(t_o + \frac{\alpha H_{np}}{2}) = \ln(1 - \frac{H_{np} K}{m_h V_o}) + \frac{H_{np} K / m_h V_o}{1 - H_{np} K / m_h V_o}. \quad /12/$$

Решая трансцендентное уравнение /12/ на ЭЦВМ определяют  $m_{hopt}$ , дающее минимум соотношению /11/.

Использование  $h_c$ -критерия более целесообразно для небольших и средних глубин бурения некрепких малоизразивных пород, для которых значение  $K$  незначительно. В этом случае результаты по  $h_c$ -критерию практически совпадают с результатами по  $T$ -критерию.

Аналогично временным критериям  $T$ ,  $h_c$ ,  $V_{rmax}$  нами рассмотрены стоимостные критерии, являющиеся модификациями рассмотренных. Стоимость бурения по всей скважине, зависящая от производительного времени бурения, определяется

$$J_{\Sigma(j)} = t_{\Sigma(j)} C + m_{(j)} d, \quad /13/$$

где  $t_{\Sigma(j)}$  - общее производительное время бурения, исходя из  $J$ -го критерия;

$C$  - стоимость станко-часа;

$m_{(j)}$  - число рейсов;

$d$  - стоимость коронки.

С учетом /7/

$$J_{\Sigma(j)} = \sum_{i=1}^{m_{(j)}} \left[ -\frac{1}{K} \ln(1 - \frac{h_i K}{V_o}) \right] C +$$

$$+ \left[ m_{(j)} t_o + \alpha \sum_{i=1}^{m_{(j)}-1} (m_{(j)} - i) h_i + (\frac{\alpha}{2} + \beta) H_{np} \right] C + m_{(j)} d. \quad /14/$$

Расчеты на ЭЦВМ показали, что стоимостные и временные критерии дают практически одинаковые результаты по стоимости бурения разведочных скважин твердосплавным инструментом.

Получение основных соотношений, характеризующих взаимосвязь оптимальных параметров  $P_{opt}$  и  $V_{opt}$  режима бурения на основе различных критериев оптимальности, позволяет более строго подходить к вопросам проектирования САУБЕ. В качестве примера покажем

получение основных соотношений при бескерновом бурении самозатачивающимся инструментом в соответствии с  $h_c$  -критерием.

Исходя из  $h_c$  -критерия суммарное производительное время бурения может быть представлено в виде

$$t_{\Sigma} = \tau_h t_0 + (\alpha \frac{m_h}{2} + \beta) H_{np} + H_{np}/V. \quad /15/$$

Примем во внимание, что  $V = B(p) v^{\delta}$ ,  $\tau_h = H_{np}/V t_{opt}$ ,  $t_{opt} = \frac{\Delta \ell}{A_2 p^{a_2} v^{b_2}}$

( $\Delta \ell$  - допускаемый износ лезвий коронки), найдем производные  $\partial t_{\Sigma} / \partial p$ ,  $\partial t_{\Sigma} / \partial v$  и приравняем их нулю. После незначительных преобразований получим

$$\frac{f'(p)}{f(p)} p = \frac{a_2 \varepsilon}{b_2}, \quad /17/$$

$$p^{a_2} v^{b_2} = \frac{\varepsilon}{b_2 - \varepsilon} \cdot \frac{\Delta \ell}{A_2 (t_0 + \alpha H_{np}/2)}. \quad /18/$$

Как видим, оптимальное значение осевой нагрузки определяется из нелинейного дифференциального уравнения /17/. Условие /18/ характеризует взаимосвязь  $P_{opt}$  и  $V_{opt}$ .

Аналогичные соотношения получены для бескернового бурения самозатачивающимся инструментом в соответствии с  $V_{rmax}$  -критерием и для затупляющегося инструмента при использовании критериев  $h_c$  и  $V_{rmax}$ .

Определены также основные соотношения для колонкового бурения самозатачивающимся инструментом при ограниченной длине рейса  $h \leq h_{kol}$ , где  $h_{kol}$  - либо длина колонковой трубы, либо значение проходки, ограниченное какими-либо технологическими условиями.

Если  $V t_{opt} = h_{rass} \leq h_{kol}$ , где  $h_{rass}$  - предполагаемое расчетное значение проходки, то режимные параметры, найденные для бескернового бурения, необходимо оставить неизменными. Если же  $h_{rass} > h_{kol}$ , тогда за счет форсирования управляющих параметров удается дополнительно снизить время бурения интервала  $h_{kol}$ , которое можно представить в виде

$$h_{kol} = V t_{opt} = \frac{B(p) v^{\delta} \Delta \ell}{A_2 p^{a_2} v^{b_2}}. \quad /19/$$

Для минимизации времени бурения скважины составим вспомогательное соотношение

$$t = \frac{\Delta \ell}{A_2 p^{a_2} v^{b_2}} + \lambda (h_{kol} - \frac{B(p) v^{\delta} \Delta \ell}{A_2 p^{a_2} v^{b_2}}). \quad /20/$$

Из системы уравнений  $\frac{\partial t}{\partial P}=0$  и  $\frac{\partial t}{\partial V}=0$ , после некоторых преобразований получим

$$\frac{x''(P)}{x(P)} P = \frac{\alpha_2 \epsilon}{b_2} \quad /21/$$

$$P^{\alpha_2} V^{b_2} = \frac{\Delta \rho V}{k_{kol} A_2} \quad /22/$$

Полученные соотношения (для наглядности вынесены на рис. I) позволяют разработать основные функциональные схемы систем автоматического управления процессом разведочного бурения.

### РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТУРЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ

Оптимизация процесса бурения требует внедрения комплекса контрольно-измерительной аппаратуры, позволяющей получать необходимую информацию о ходе процесса и своевременно воздействовать на него. Техническая реализация САУПБ усложняется ограниченностью сведений о физико-механических свойствах бурильных пород, наличием весьма значительного уровня помех, нестационарностью объекта управления.

В работе рассмотрены вопросы технической реализации измерителей осевой нагрузки, нагрузки на крюк и скорости бурения, а также исследованы основные составляющие погрешности измерений.

Апроксимируя бурильную колонну тремя сосредоточенными массами, соединенными упругими звеньями, получено дифференциальное уравнение, связывающее осевую нагрузку  $P$  с нагрузкой на датчик  $P_{g\phi}$ .

$$\frac{m^2}{\alpha_k \alpha_{tp}} \cdot \frac{d^4 P_{g\phi}}{dt^4} + \frac{2m C_k}{\alpha_k \alpha_{tp}} \cdot \frac{d^3 P_{g\phi}}{dt^3} + \left( \frac{m}{\alpha_k} + \frac{2m}{\alpha_{tp}} + \frac{C_k^2}{\alpha_k \alpha_{tp}} \right) \frac{d^2 P_{g\phi}}{dt^2} + \\ + \left( \frac{2C_k}{\alpha_{tp}} + \frac{C_k}{\alpha_k} \right) \frac{d P_{g\phi}}{dt} + P_{g\phi} = \frac{1}{2} (P_{kol} - P - C_k V),$$

/23/

где  $\alpha_{tp}, \alpha_k$  - коэффициенты жесткости троса и колонны;

$m$  - масса 1/3 части колонны;

$C_k$  - коэффициент вязкого трения;

$P_{kol}$  - вес колонны в промывочной жидкости.

На ЭЦВМ произведены расчеты амплитудно-частотной характеристики

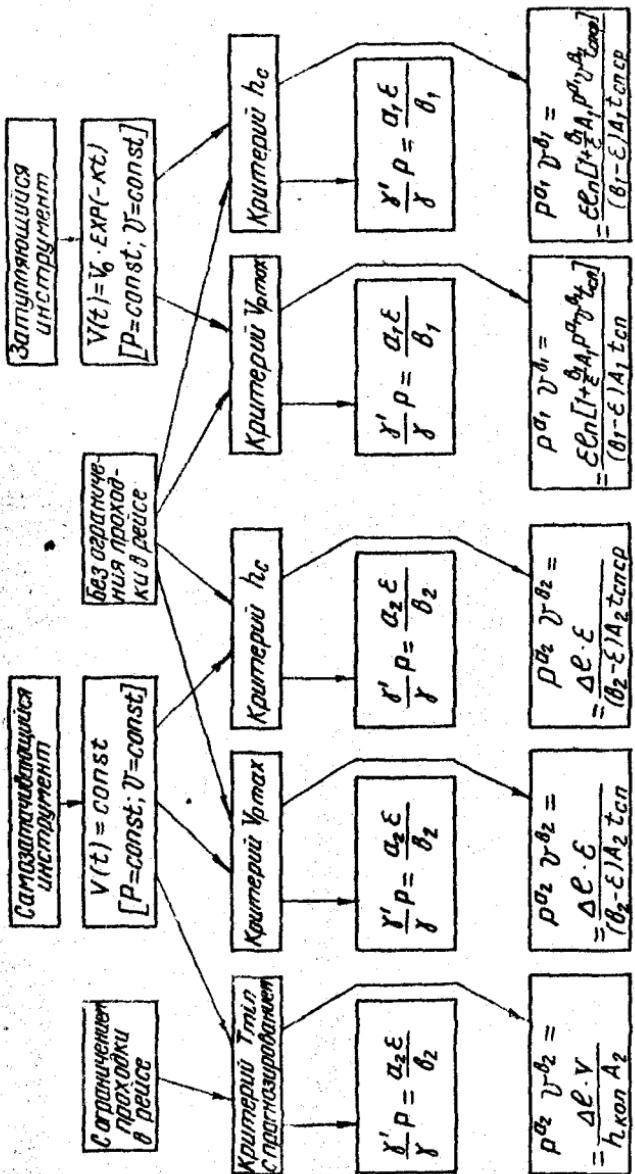


Рис. 1. Основные соотношения оптимальных параметров режима бурения

тики колонны для различных глубин и значений коэффициента вязкого трения. В связи с тем, что низкочастотные гармонические составляющие помехи (порядка 2+5 Гц) проходят от забоя к датчику с небольшим затуханием, подробно исследован вопрос ослабления влияния помех при измерении среднего значения осевой нагрузки приборами интегрирующего типа путем многократного (многоканального) интегрирования.

Измеряемая величина  $P_{\text{зр}}$  представляет собой аддитивную смесь полезного сигнала  $P_o$  и полигармонической помехи  $\Delta P_n(t)$

$$P_{\text{зр}} = P_o \left[ 1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \right], \quad /24/$$

где  $\alpha_i, \omega_i, \varphi_i$  – относительная амплитуда, частота и фаза  $i$ -той гармонической составляющей помехи.

Если коэффициент подавления  $i$ -той гармоники помехи при однократном интегрировании определяется выражением

$$B_{ni} = 20 \lg \left| \frac{\sin \kappa_i \pi}{\sin \kappa_i \pi \cdot |\sin(\kappa_i \pi + \varphi_i)|} \right|, \quad /25/$$

то при  $m_n$ -кратном интегрировании

$$B_{mi} = 20 \lg \left( \frac{\kappa_i \pi}{\sin \kappa_i \pi} \right)^2 \frac{\left| \sin \frac{\kappa_i \pi}{m_n} \right|}{\frac{\kappa_i \pi}{m_n} \cdot \left| \sin \left[ \kappa_i \pi \left( \frac{2m_n-1}{m_n} \right) + \varphi_i \right] \right|}, \quad /26/$$

где  $\kappa_i$  – отношение времени измерения к периоду  $i$ -той гармоники.

Низкочастотные помехи оказываются дополнительно подавленными с крутизной 20 дБ на декаду при использовании указанного метода измерения.

При создании САУПЕ необходимы измерители скорости бурения повышенной точности, наиболее помехоустойчивые, так как они предназначены для работы в экстремальных регуляторах, основанных на дифференцировании инфразвукового сигнала при значительном уровне помех.

В работе предлагается косвенный метод контроля относительной скорости бурения при работе импульсной системы подачи, который может быть использован при построении одноканальной экстремальной системы управления процессом бурения. О скорости бурения в этом случае судят по частоте срабатывания  $f_{\text{зрк}}$  электрогидроклапана

САУ Р . В случае использования релейной системы стабилизации

$$f_{ЭГК} = \left[ \frac{H \cdot \mathcal{U}_{пор}}{V E_k F_k K_2} + T_0 \right]^{-1}$$

127/

и частотно-импульсной системы

$$f_{ЭГК} = \left[ \left( \frac{H \cdot \mathcal{U}_{пор}^2}{V E_k F_k K_2} \right)^{0.5} + T_0 \right]^{-1},$$

128/

где  $H$  - глубина скважины;

$E_k F_k$  - жесткость бурильной колонны;

$\mathcal{U}_{пор}$  - пороговое напряжение;

$K_2$  - коэффициент передачи датчика нагрузки;

$T_0$  - рабочее время растормаживания гидротормоза.

Так как при создании двухканальной САУПБ необходимо контролировать абсолютное значение скорости бурения, поэтому разработан, изготовлен и исследован дискретный измеритель средней скорости бурения, состоящий из механического преобразователя линейного перемещения каната в угловое емкостного датчика и электронного блока. Данные энтропийные оценки составляющих погрешности измерения скорости бурения.

На основе разработанных приборов и устройств, исследований критерии оптимизации и полученных уравнений взаимосвязи оптимальных режимных параметров рассмотрены некоторые варианты построения двухканальной поисково-программной САУПБ.

В исследованиях В.А. Цыганкова отмечается, что практически невозможно получать текущие значения целевого функционала непосредственно в процессе бурения, т.е. без запаздывания. Известные САУПБ строятся на основе статистических зависимостей - программируемые САУ или комбинированные САУ поисково-программного типа.

Задачу поддержания производительности бурового станка на оптимальном уровне можно разбить на две частные задачи:

1) поддержание режима бурения на средне-статистическом уровне по скважине или рейсу; 2) поддержание режима бурения на оптимальном уровне, учитывающем бурильность пород.

В первом случае задается средне-статистическое значение  $\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}_{op}$  и значение  $P_{opt}$  определяется из дифференциального уравнения

$$\frac{d\bar{\epsilon}}{dP} / \frac{\delta}{P} = \bar{\epsilon}.$$

129/

Как видно из /29/, в левой части стоит отношение  $\gamma'$  к величине  $\gamma/P$ , которое выражает отношение  $\operatorname{tg}\alpha_{1P}/\operatorname{tg}\alpha_{2P}$  в произвольной точке  $M$  с абсциссой  $P_M$  (рис.2а). Данное отношение, которое называют коэффициентом влияния осевой нагрузки, обозначено через  $Z_B(P)$ . На рис.2б изображена кривая  $Z_B(P)$ , построенная исходя из рис.2а.

Так как при нахождении  $P_{opt}$  должно выполняться условие  $Z_B(P) = \varepsilon$  и значение  $\varepsilon$  лежит в диапазоне (0,240,9) для различных пород, то очевидно, что  $P_{opt}$  лежит правее базового значения  $P_b$ , соответствующего точке  $N$  с максимальным значением  $\operatorname{tg}\alpha_{2P}$ .

Нахождение  $P_{opt}$  может быть осуществлено с помощью поисковой системы по знаку разности  $[Z_B(P) - \varepsilon]$ , причем при  $P < P_{opt}$  эта разность положительна, а при  $P > P_{opt}$  — отрицательна.

Нахождение  $V_{opt}$  осуществляется с помощью функциональных преобразователей, реализующих зависимости типа /18/, /22/.

В связи с большим объемом колонкового бурения рассмотрен принцип построения САУПБ для бурения разнородных пород самозатачивающимся инструментом с ограниченной проходкой в рейсе. В алгоритме работы системы присутствует этап измерения показателя  $\varepsilon$  и уже на основе измеренного значения  $\varepsilon_{изм}$  определяются с помощью экстремального регулятора с формированием фиктивного экстремума значение  $P_{opt}$ , а с помощью функциональных преобразователей значение  $V_{opt}$ .

На основе изложенного структурная схема САУ процессом механического колонкового бурения, осуществляющей поиск и поддержание оптимальных значений режимных параметров  $P_{opt}$  и  $V_{opt}$ , может быть построена в виде, представленном на рис.3. С помощью устройства измерения показателя  $\varepsilon(УИ\varepsilon)$ , которое входит в экстремальный регулятор с формированием фиктивного экстремума ЭРФЭ, определяется значение  $\varepsilon$ . ЭРФЭ на основе  $V$  и  $\varepsilon$  вырабатывает соответствующую команду, позволяющую найти  $P_{opt}$ . После этого вступает в работу канал управления частотой вращения. Сигнал задания  $V_{зад}$  вырабатывается функциональным преобразователем ФП1 на основе входных величин  $P$  и  $\Psi(V)$ , а величина  $\Psi(V) = V/A_2$ , в свою очередь, с помощью ФП2.

#### ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЙ КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ БУРОВОМ СТАНКЕ

В Ключевской ИРП экспедиции "уралуглеразведка" внедрен и находится в стадии доводки информационно-управляющий комплекс при-

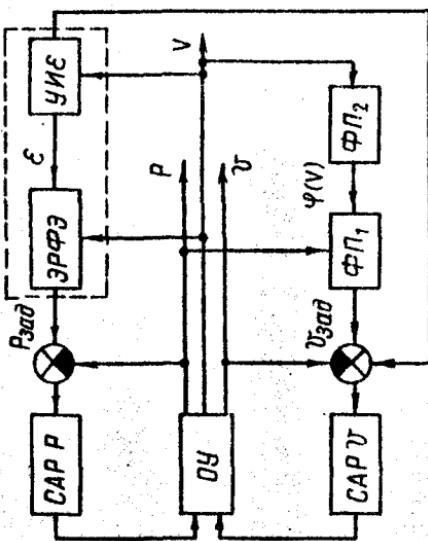
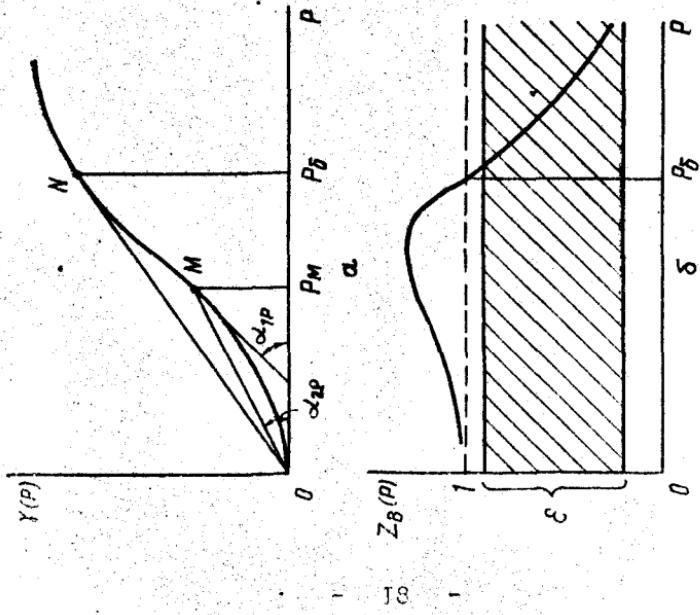


Рис. 3. Структурная схема двухконтурной поисково-программной САУТБ

Рис. 2. Графические пояснения к методике отыскания оптимального значения осевой нагрузки



боров и устройств, установленный на станке ЭМФ 650М. В этот комплекс входят (рис.4): I - регулируемый привод постоянного тока САРУ, состоящий из двигателя постоянного тока ДП-52, тахогенератора и тиристорного преобразователя; II - импульсная система подачи бурового инструмента, состоящая из гидроцилиндра ГЦ, электрогидроклапана ЭГК, гидронасоса ГН, электронного блока ЭБ<sub>3</sub>; III-измерительные приборы и устройства, в состав которых входят измерители осевой нагрузки и нагрузки на крюк (датчик нагрузки ДН, электронный блок ЭБ<sub>1</sub>, аналоговый прибор Р) <sup>X</sup>, скорости бурения (датчик скорости бурения ДСБ, входное устройство ВУ, электронный блок ЭБ<sub>2</sub>, аналоговый прибор В) , частоты вращения (тахогенератор ТГ и аналоговый прибор П); IV-блок управления ЕУ с регуляторами настройки.

Разработанный комплекс позволяет повысить производительность станка, проводить технологические исследования в производственных условиях, изучать динамику и статику буровой установки, проводить контроль и регистрацию процесса бурения.

В работе дано подробное описание комплекса и работы с ним, приведены основные принципиальные и функциональные схемы приборов и устройств.

Лабораторные и производственные исследования комплекса аппаратуры показали, что разработанные устройства обладают сравнительно высокими точностными характеристиками. В частности, нестабильность поддержания заданного значения осевой нагрузки менее 100 кгс, относительная нестабильность поддержания частоты вращения бурового снаряда порядка 5%, приведенная погрешность измерения нагрузки на крюке 1,5%, приведенная погрешность измерения скорости перемещения крюка составила порядка 1,5% и скорости бурения порядка 3% (при времени усреднения 16 с).

Годовой экономический эффект от внедрения разработанных устройств составил порядка 8 тыс. рублей в год на один буровой агрегат.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

I. Исследованы различные стратегии проходки скважины при разведочном бурении в условиях однородных пород. Дается подробный

<sup>X</sup> Прибор прошел поверку в Челябинской лаборатории Государственного надзора за стандартами и измерительной техникой.

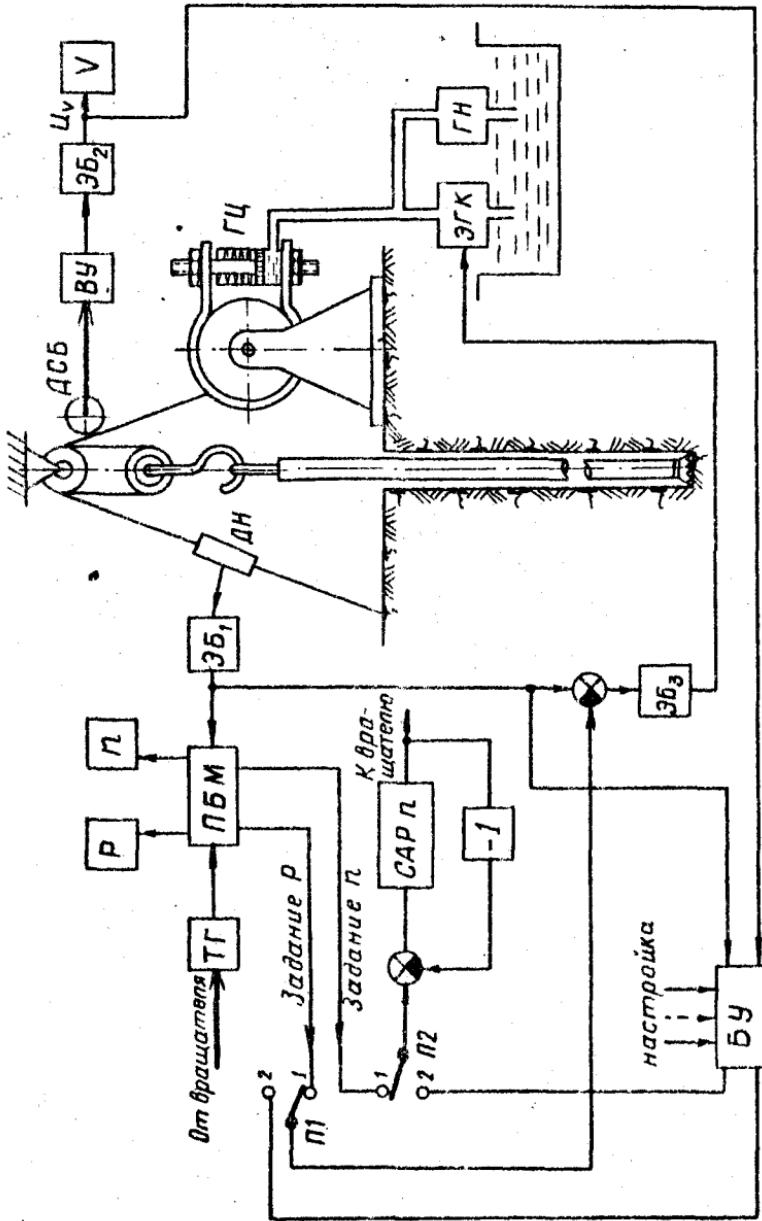


Рис.4. Информационно - управляемый комплекс аппарата на буровом станке

вывод критерия минимального времени проходки скважины и критерия постоянных проходок, названных нами соответственно  $T$ -критерием и  $h_c$ -критерием. Расчетами на ЭЦВМ подтверждено, что  $T$ -критерий дает оптимальную стратегию проходки скважины, в то время как критерий максимальной рейсовой скорости  $V_{rmax}$  дает квазиоптимальную стратегию. Произведено сравнение  $h_c$ -критерия с критерием  $V_{rmax}$  и с  $T$ -критерием. Показаны области более эффективного бурения при использовании  $h_c$ -критерия и  $V_{rmax}$ -критерия.

2. Исследованы стоимостные критерии: оптимальный критерий минимума стоимости I м проходки скважины (модификация  $T$ -критерия), квазиоптимальный критерий минимума стоимости I м проходки (модификация  $V_{rmax}$ -критерия), квазиоптимальный критерий постоянных проходок, минимизирующий стоимость I м проходки (модификация  $h_c$ -критерия). Расчетами показано, что критерии временные и стоимостные весьма близки по конечным результатам для разведочного бурения твердосплавным инструментом.

3. Рассмотрены основные соотношения между оптимальными режимными параметрами для бурения колонкового и боксернового, для затупляющегося и самозатачивающегося инструмента при использовании критериев  $h_c$  и  $V_{rmax}$ . Полученные соотношения могут быть использованы для построения конкретных вариантов системы управления осевой нагрузкой и частотой вращения инструмента.

4. Разработана двухканальная система автоматического регулирования процессом бурения, которая обеспечивает раздельное регулирование частоты вращения инструмента и осевой нагрузки при свободной подаче породоразрушающего инструмента. Система использована, в первую очередь, как исполнительный узел в системе оптимизации процессом разведочного бурения, а также в качестве автономного измерительного и контролирующего устройства. Предложен также комбинированный вариант частотно-импульсной системы подачи породоразрушающего инструмента, работающий в дискретно-непрерывном режиме, дистигнуто благодаря использованию в качестве исполнительного элемента шагового двигателя.

5. Рассмотрены основные факторы, влияющие на точность косвенных измерений осевой нагрузки. Даны оценка эффективности многократного (многократного), с использованием кусочно-линейной весовой функции, метода среднего значения осевой нагрузки приборами интегрирующего типа, при котором низкочастотные помехи оказываются дополнительно подавленными с крутизной 20 дБ на декаду. Прое-

ден расчет амплитудно-частотной характеристики бурильной колонны для глубин разведочного бурения от 20 до 750 м и различных значений коэффициентавязкого трения. Расчеты показывают, что колебания колонны до 2÷5 Гц проходят от забоя к поверхности с небольшим затуханием. Рассмотрены вопросы построения магнитоупругого датчика растягивающих усилий с трансформаторно-мостовой схемой включением, условие уменьшения нелинейности характеристики преобразователя, влияние нелинейности датчика на погрешность измерения осевой нагрузки. Дана качественная оценка погрешностей измерения осевой нагрузки.

6. Предложен косвенный метод измерения скорости бурения при использовании САРР импульсного типа, который может быть применен в одноканальной экстремальной системе управления процессом бурения. Рассмотрена зависимость частоты работы импульсного органа подачи от параметров настройки системы и буримости пород. Разработан дискретный измеритель средней скорости бурения на основе емкостного датчика и исследованы основные составляющие погрешности измерения.

7. Рассмотрены два варианта поисково-программной двухканальной САУПЕ, обеспечивающие поддержание режима бурения на средне-статистическом уровне по скважине (рейсу) и на оптимальном уровне, учитывающем буримость пород. Принцип построения САУПЕ сводится к следующему: экстремальным регулятором с формированием фiktивного экстремума находится оптимальное значение осевой нагрузки, а значение частоты вращения корректируется с помощью функционального преобразователя.

8. Разработаны, изготовлены и прошли испытания измеритель механических усилий с приведенной погрешностью измерения 1,5%, измеритель скорости перемещения крюка с приведенной погрешностью измерения 1,5% (измерение скорости бурения осуществляется с погрешностью  $\approx 3\%$ ), система стабилизации осевой нагрузки с нестабильностью поддержания заданного значения менее 100 кгс и двухканальный блок управления процессом бурения. Испытания информационно-управляющего комплекса аппаратуры показали, что внедрение его на сурском агрегате дает фактическую экономию порядка 8 тыс. рублей в год на один станок.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

I. О взаимосвязи параметров режима бурения при создании двух-

канальной системы оптимизации. М., ВИЭМС, экспресс-информация, 1974, № 15 (соавторы Гафиятуллин Р.Х., Козловский Е.А.).

2. Сравнительная оценка критериев максимума рейсовой скорости и минимума времени проходки скважины. Известия ВУЗов "Горный журнал", 1974, № 10 (соавторы Гафиятуллин Р.Х., Юдкевич М.Л.).

3. О критериях управления при разведочном бурении твердо-сплавным затупляющимся инструментом. Известия ВУЗов "Горный журнал", 1974, № 12 (соавтор Гафиятуллин Р.Х.).

4. Оптимальный критерий управления в сравнении с квазипартиальными критериями при разведочном бурении. Статья депонирована в ВИНТИ, № 1540-74 деп., 1974 (соавторы Гафиятуллин Р.Х., Юдкевич М.Л.).

5. Устройство для формирования фиктивного экстремума в шаговых экстремальных регуляторах. Авт.свид. № 415639, ОИПОТЗ, 1974, № 6 (соавторы Гафиятуллин Р.Х., Верзаков А.С., Дмитриев Ю.Г., Зубцов П.А.).

6. Двухканальная система управления ДСУ-73 геологоразведочным буровым станком. Проспект ВДНХ. Министерство угольной промышленности СССР, НИИГР, 1974 (соавторы Гафиятуллин Р.Х. и др.).

7. Система автоматической подачи породоразрушающего инструмента. "Разведка и охрана недр", 1975, № 3 (соавторы Гафиятуллин Р.Х., Хмелевцев А.Д., Юдкевич М.Л.).

8. Регулятор осевой нагрузки. Авт.свид. № 471419, ОИПОТЗ, 1975, № 19 (соавторы Гафиятуллин Р.Х., Дегтярев В.А., Фрейман А.Л., Юдкевич М.Л.).

9. Оценка эффективности многоканального метода измерения среднего значения сигнала. Тезисы докладов Всесоюзной конференции по измерительно-информационным системам. Раздел I. Ивано-Франковск, 1973 (соавторы Верзаков А.С., Гафиятуллин Р.Х., Зубцов П.А., Михайленко В.В.).

10. Магнитоупругий измеритель осевой нагрузки и нагрузки на крюке бурового станка. Информационный листок (ЦНИИ), Челябинск, 1975, № 461 (соавторы Гафиятуллин Р.Х., Гаврилов С.В., Рахматуллин Р.М.).

11. Цифровая экстремальная система управления процессом механического колонкового бурения. Тезисы докладов к Первой научно-технической конференции молодых ученых Урала. Свердловск, 1972.

12. Цифровой указатель момента достижения точки перегиба экстремальной характеристики процесса бурения. (Там же).

13. Цифровой измеритель низких частот. Авт.свид. № 408231, ОИПОТЗ, 1973, № 47 (соавторы Болтачев Н.П., Верзаков А.С., Зубцов П.А., Михайленко В.В.).

14. Измеритель малых скоростей перемещения каната буровой лебедки. Информационный листок (ЦНТИ), Челябинск, 1975, № 460 (соавторы Гафиятуллин Р.Х., Новоселов Е.Н.).

15. Реверсивный счетчик. Авт.свид. № 414744, ОИПОТЗ, 1974, № 5 (соавторы Болтачев Н.П., Верзаков А.С., Зубцов П.А., Михайленко В.В.).

16. Входное устройство для экстремального регулятора. Авт. свид. № 413458, ОИПОТЗ, 1974, № 4 (соавторы Болтачев Н.П., Верзаков А.С., Дмитриев Ю.Г., Зубцов П.А.).

Лях Николай Ефимович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ  
И АППАРАТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗВЕДОЧНОГО  
БУРЕНИЯ

Технический редактор А.В. Миних

6Б 04380. Подписано к печати 6/XI-76 г. Формат бумаги 60x90/16.  
Объем 1,5 п.л. Отпечатано на ротапринте ЧШИ. Тираж 120 экз. Заказ № 360/1444.