

На правах рукописи

МОЛДАВЦЕВ Сергей Анатольевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
УГЛУБЛЕНИЯ ЗАБОЯ СКВАЖИНЫ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ
ДИНАМИКИ ШАРОШЕЧНОГО ДОЛОТА И БУРИЛЬНОЙ
КОЛОННЫ

Специальность 05.15.10 - Бурение скважин

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



00819712 (S)

Работа выполнена в Ивано-
и газа.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: доктор технических наук,
профессор ВЕКЕРИК В.И.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор технических наук,
профессор ЯСОВ В.Г.
кандидат технических наук
ФРИЗ И.М.

ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ: УКРНИИГАЗ

Защита диссертации состоится 11 ноябре 1992 г.
в 16 часов на заседании специализированного ученого совета
Д 068.42.01 при Ивано-Франковском институте нефти и газа по
адресу: 284018, г. Ивано-Франковск, ул. Карпатская, 15

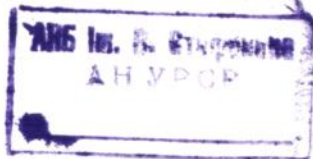
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан 9 октябре 1992 года

Ученый секретарь
специализированного
ученого совета

В.И.

ВЕКЕРИК В.И.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Из механических способов разрушения горных пород наибольшее распространение получил вращательный способ бурения с применением шарошечных долот. При бурении нефтяных и газовых скважин проходка шарошечными долотами составляет более 90% общего объема проходки.

Эффективность работы шарошечных долот, их надежность и долговечность зависят как от совершенства конструкции, качества и точности изготовления, так и от условий эксплуатации. Различные сочетания параметров режима бурения и компоновки бурильной колонны обуславливают изменение показателей эффективности процесса бурения.

В настоящее время научными организациями проводятся широкие теоретические и экспериментальные исследования динамики работы шарошечных долот и компоновки бурильного инструмента. Установлены основные закономерности процесса разрушения пород, изучены кинематика и динамика взаимодействия вооружения шарошечного долота с забоем, исследованы особенности работы компоновки бурильного инструмента в скважине. Однако, до сегодняшнего дня подбор параметров долот, компоновок бурильного инструмента, а также режима их работы осуществляется при недостаточном научном обосновании из-за отсутствия расчетных аналитических моделей, описывающих углубление забоя скважины с учетом динамического режима работы бурильного инструмента. Существующие аналитические модели работы бурильного инструмента составлены по упрощенным схемам, не учитывают особенности деформирования и разрушения породы вооружением шарошек и в большинстве случаев не доведены до определения численных значений показателей эффективности углубления

забоя.

В связи с необходимостью глубокого и всестороннего изучения комплексного влияния конструктивных параметров шарошечного долота, компоновки бурильной колонны и режима их работы на эффективность разрушения забоя в настоящее время возникла необходимость разработки обобщенных математических моделей работы сложных буровых механических систем, на основе которых можно провести теоретические и экспериментальные исследования для совершенствования технических средств и обоснования путей выбора эффективных технико-технологических параметров процесса бурения.

Цель работы. Создание и апробация математической модели работы шарошечного долота в процессе бурения, учитывающей особенности взаимодействия его вооружения с деформируемым и разрушаемым забоем, влияние конструктивных параметров долота, компоновки бурильной колонны и параметров режима бурения на динамичность и эффективность процесса углубления скважины.

Основные задачи исследований. 1. Анализ аналитических моделей работы бурильной колонны и шарошечного долота, учитывающих взаимодействие его вооружения с поверхностью забоя.

2. Составление системы дифференциальных уравнений, описывающей движение шарошечного долота при углублении забоя скважины.

3. Построение обобщенной аналитической модели динамики буровой системы "шарошечное долото-бурильная колонна-буровая вышка", устанавливающей взаимосвязи между параметрами бурильного инструмента и показателями эффективности процесса бурения.

4. Проведение вычислительного эксперимента для анализа влияния параметров компоновки бурильного инструмента и режима

работы на динамику и эффективность углубления скважин.

5. Оценка качественного соответствия расчетных зависимостей экспериментальным данным, полученным при исследовании динамики шарошечных долот на стенде и в промышленных условиях при бурении скважин.

Научная новизна. I. Установлены аналитические зависимости для определения кинематических и динамических параметров взаимодействия вооружения шарошечного долота с забоем, кинетической энергии движения долота, вариаций работ и обобщенных сил при взаимодействии его вооружения с разрушаемой поверхностью забоя.

2. Впервые разработана аналитическая модель углубления забоя скважины вооружением шарошечного долота, учитывающая взаимосвязанные продольные и крутильные колебания буровой колонны и основные параметры буровой установки.

3. Выявлено при вычислительном эксперименте моделирования работы системы "порода-шарошечное долото-буровая колонна" влияние параметров режима бурения и компоновки буровой колонны на изменение механической скорости и энергоемкости углубления скважины.

4. Обоснована возможность прогнозирования динамики и показателей эффективности работы шарошечного долота в процессе бурения.

Практическая ценность. I. Предложены системы дифференциальных уравнений, алгоритм их решения и компьютерная программа расчета кинематических и динамических параметров взаимодействия вооружения шарошечного долота Ш 295.3 С-ГЛУ с забоем, динамических составляющих осевой силы и крутящего момента на долоте и в сечениях буровой колонны.

2. Установлены зависимости для исследования комплексного влияния параметров бурильной колонны, шарошечного долота, а также режима их работы на динамику буровой механической системы и на эффективность углубления забоя.

3. Уточнена методика прогнозирования скорости углубления забоя, долговечности опор и вооружения долота.

4. Проведена оценка влияния параметров виброзащитных инструментов (ВЗИ) на изменение динамических параметров работы шарошечного долота, на механическую скорость и энергоемкость углубления забоя.

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении хозяйственной тематики в научно-исследовательском секторе Ивано-Франковского института нефти и газа, переданы Дрогобычскому долотному заводу для использования при проектировании вооружения шарошечных долот и рекомендованы для использования в Ивано-Франковском институте нефти и газа в учебном процессе.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на V Всесоюзной конференции "Разрушение горных пород" (Уфа, 1990г.) конференциях профессорско-преподавательского состава и молодых ученых ИИИП (1990-1992 гг.), а также на НТС объединения "Полтава-нефтегазгеология", научных семинарах кафедр теоретических основ механики и бурения нефтяных и газовых скважин Ивано-Франковского института нефти и газа.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 6 работах, в том числе получено I авторское свидетельство на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов. Общий объем работы состав-

ляет 192 страницы, в том числе 172 страницы машинописного текста и включает 12 таблиц, 17 рисунков, список литературы из 94 наименований и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, указана практическая ценность работы и пути ее реализации в практике бурения.

В первой главе описано современное состояние изучения динамического взаимодействия шарошечных долот с горной породой.

Значительный вклад в исследование работы шарошечных долот, закономерностей взаимодействия их вооружения с породой и изучение влияния параметров компоновки бурильной колонны на эффективность процесса бурения внесли Абдуладзе А.М., Алексеев Л.А., Алексеев Ю.Ф., Байдук Б.В., Балицкий В.П., Балицкий П.В., Бицута В.К., Бредо В.Г., Васильев Ю.С., Векерик В.И., Владиславлев В.С., Вискребцов В.Г., Григулейцкий В.Г., Гуреев И.В., Жилощев Н.А., Жлобянский Б.А., Колесников Н.А., Копылов В.Е., Мавлютов М.Р., Мирзаджанзаде А.Х., Некрасов А.М., Огородников П.И., Писов А.Н., Санников Р.Х., Симонов В.В., Симонянц Л.Е., Спивак А.И., Стрекалсва Р.Б., Султанов Б.З., Сурнин Л.С., Тимофеев Н.С., Трушкин Б.Н., Федоров В.С., Филимонов Н.М., Царилли В.В., Шаринзаде С.А., Эйгелес Р.М., Юнин Е.К., Яремичук Р.С., Ясов В.Г.

Взаимодействие шарошечных долот с горной породой в процессе бурения приводит к возникновению взаимосвязанных продольных, крутильных и поперечных колебаний буровой системы "долото-бурильная колонна-буровая вышка". Анализ энергетических моделей взаимодействия вооружения шарошечного долота с забоем скважины пока-

зал, что для исследования динамических процессов используются упрощенные расчетные модели, описывающие, обычно, какой-либо один вид колебаний. При этом большинство исследований посвящено описанию осевых зубцовых колебаний, генерируемых долотом, исходя из кинематики перекачивания зубчатого венца по недеформируемому или деформируемому забоям.

Общим недостатком рассмотренных в работе математических моделей взаимодействия шарошечного долота с забоем скважины является то, что они не учитывают взаимное влияние различных видов колебаний, а также не позволяют прогнозировать показатели эффективности бурения. При их использовании также представляется затруднительным изучение влияния параметров компоновки буровой колонны и режима бурения на эффективность работы шарошечного долота.

В работе проведен анализ исследований, посвященных изучению динамики колонны буровых труб и ее влияния на процесс бурения. Установлено, что при использовании различных компоновок, включения в них ВЗИ динамика взаимодействия породоразрушающего инструмента с забоем и показатели эффективности углубления скважины могут существенно изменяться. Отмечено, что при составлении математической модели работы бурового инструмента необходимо учитывать совместную работу долота и буровой колонны. Наиболее перспективной, требующей дальнейшего развития, нам представляется модель совместной работы шарошечного долота и буровой колонны, предложенная Эйгелесом Р.М. и Стрекаловой Р.В.

Сложность математического описания протекающих при бурении процессов не позволила до сих пор создать обобщенные аналитические модели работы бурового инструмента, учитывающие особенности взаимодействия вооружения шарошечного долота с породой, обладающей данными механическими характеристиками, влияние парамет-

ров компоновки бурильной колонны и режима бурения на динамику и показатели эффективности работы долота.

До сих пор нет обобщенных расчетных зависимостей для прогнозирования механической скорости бурения, показателей долговечности и надежности работы шарошечных долот, отсутствуют методические рекомендации по подбору параметров компоновок бурильных колонн и режима бурения для совершенствования процесса углубления забоя.

В соответствии с изложенным определена цель и поставлены задачи исследований настоящей работы.

Во второй главе приведены результаты аналитического исследования динамики шарошечного долота в процессе бурения.

Для изучения движения шарошечного долота в процессе бурения принята следующая расчетная схема. Долото содержит i шарошек, на каждой из которой имеется $n(i)$ венцов, содержащих по $q(i, n)$ зубцов. При исследованиях приняты допущения, что корпус долота и шарошки недеформируемы, ось цапф корпуса долота и вращения шарошек совпадают, центры тяжести корпуса долота и шарошек находятся на осях их вращения, ось вращения корпуса долота совпадает с осью скважины. Полагаем, что корпус долота в скважине имеет две степени свободы – продольное смещение вдоль оси скважины и вращение относительно этой оси. Вектор силы \vec{P}_{iq} , действующей на q -й зубец n -го венца i -й шарошки при внедрении его в породу, для данного типоразмера зубца, забойного давления и при контакте с породой данного промышленного раствора считаем заданным в виде функциональной зависимости от значения текущего вектора \vec{z}_{iq} перемещения центра площадки притупления данного зубца в породе, и вектора \vec{v}_{iq} скорости этого перемещения.

Исходя из сделанных допущений, на механическую систему "ме-

рошечное долото" наложены геометрические стационарные связи. Следовательно, движение долота при принятых допущениях может быть описано системой уравнений Лагранжа II рода.

В качестве обобщенных координат долота приняты:

- смещение $U_g(t)$ корпуса долота вдоль оси скважины относительно его начального положения как функция от времени;
- угол $\theta_g(t)$ поворота корпуса долота вокруг оси скважины относительно его начального положения как функция от времени;
- угол $\beta_i(t)$ поворота i -й шарошки вокруг оси цапфы относительно ее начального положения относительно цапфы как функция от времени.

Для изучения движения шарошечного долота введены следующие системы координат:

- неподвижную $O_{gs} X_1 X_2 X_3$, связанную с забоем скважины. Центр O_{gs} системы является точкой пересечения оси скважины с забоем. Ось $O_{gs} X_1$ - касательная к оси скважины в точке O_{gs} ;
- связанную $O_g \eta_1 \eta_2 \eta_3$, с корпусом долота, оси которой являются главными центральными осями инерции корпуса долота. Ось $O_g \eta_1$ является осью вращения корпуса долота и совпадает с осью $O_{gs} X_1$;
- связанную $O_i \mu_1 \mu_2 \mu_3$ с i -й шарошкой, оси которой являются главными центральными осями инерции i -й шарошки. Ось $O_i \mu_1$ совпадает с осью соответствующей цапфы долота.

Рассмотрим положение долота в произвольный момент времени, характеризуемое текущими значениями обобщенных координат $U_g(t)$, $\theta_g(t)$, $\beta_i(t)$. Введем систему векторов \vec{R}_{ing} , соединяющих точку O_{gs} с центром площадки притупления q -го зубца n -го венца i -й шарошки.

В работе определены проекции векторов \vec{R}_{ing} , \vec{Z}_{ing} перемещения зубцов в породе и \vec{U}_{ing} скорости этого перемещения на оси

системы координат $O_g x_1, x_2, x_3$, связанной с забоем, как функции от текущих значений $U_g(t), \theta_g(t), \beta_i(t)$ обобщенных координат долота, геометрических параметров размещения вооружения на поверхности шарошек и расположения шарошек относительно корпуса долота. Определены условия входа и выхода зубцов из взаимодействия с породой в моменты времени $t_{in}^{dx}, t_{in}^{dax}$ при описании поверхности забоя функциональной зависимостью $x_1 = \varphi(x_2, x_3, t)$ в системе координат $O_g x_1, x_2, x_3$

Кинетическая энергия долота определена как функция от текущих значений производных $\dot{U}_g(t), \dot{\theta}_g(t), \dot{\beta}_i(t)$ обобщенных координат долота по времени, массы m_{kg} , и момента инерции J_{kg} корпуса долота относительно оси $O_g \eta_1$, масс m_i и главных моментов инерции J_{ki}, J_{zi} шарошек, расстояний a_i от центров тяжести шарошек до оси вращения долота и углов наклона ψ_i осей вращения шарошек к оси вращения долота.

После определения обобщенных сил $Q_{U_g}, Q_{\theta_g}, Q_{\beta_i}$ и необходимых преобразований получена система уравнений движения долота в процессе бурения произвольно ориентированной скважины при принятых допущениях об особенностях его работы в виде

$$\left. \begin{aligned} m_g \ddot{U}_g &= P_k + F_c + F_{тр} + \sum_j P_{tr, g, j} - m_g g + P_{g^0}, \\ \alpha_g \ddot{\theta}_g + \sum_i J_{ki} \cos \psi_i \ddot{\beta}_i &= M_{nk} + M_c + M_{тр} + \sum_i M_{ni} + M_{g^0}, \\ J_{ki} \ddot{\beta}_i + J_{ki} \cos \psi_i \ddot{\theta}_g &= M_{ci} + M_{tpi} + M_{nii}, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} (2.1)$$

где $\alpha_g = J_{kg} + \sum_i (m_i a_i^2 + J_{ki} \cos^2 \psi_i + J_{zi} \sin^2 \psi_i)$; P_k, M_{nk} - осевая сила и крутящий момент, действующие на долото со стороны буровой колонны; F_c - сила сопротивления промышленной жидкости осевому перемещению долота; $F_{тр}, P_{tr, g, j}$ - проекции силы трения долота о стенку скважины и силы, действующей на долото из-за пе-

решада давления промывочной жидкости в j -й насадке на ось $Oq\eta_j$ долота; P_{jgs} , M_{jgs} - проекции реакции и момента реакции забоя, действующие на вооружение шарошечного долота на ось $Oq\eta_j$; M_{ci} - моменты сопротивления промывочной жидкости и шлама вращению долота относительно оси $Oq\eta_j$ и i -й шарошки относительно оси $Oq\mu_i$; M_{tr} - момент трения долота о стенку скважины; M_{tr_i} - момент трения в опоре i -й шарошки; M_{mii} - проекция вектора момента, действующего на i -й шарошку со стороны забоя на ось $Oq\mu_i$.

Для определения величин P_{jgs} , M_{jgs} , M_{mii} и кинематических параметров долота получена следующая система уравнений, моделирующая взаимодействие вооружения долота с забоем скважины

$$\begin{aligned} \text{если } R_{ring} &\geq \varphi(R_{zring}, R_{ring}, t), \text{ то} \\ Z_{jing} &= 0, \quad U_{jing} = 0, \quad j = 1, 2, 3; \\ \text{если } R_{ring} &< \varphi(R_{zring}, R_{ring}, t), \text{ то} \\ R_{ring}^{bx} &= \varphi(R_{zring}^{bx}, R_{zring}^{bx}, t_{ring}^{bx}), \\ Z_{jing} &= R_{jing} - R_{jing}^{bx}, \quad U_{jing} = \frac{dZ_{jing}}{dt}, \\ P_{ring} &= f_1(Z_{jing}, U_{jing}), \quad R_{zring} = f_2(Z_{jing}, U_{jing}), \quad P_{ring} = f_3(Z_{jing}, U_{jing}), \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$j=1, 2, 3;$$

$$P_{jgs} = \sum_{ring} P_{ring},$$

$$M_{jgs} = \sum_{ring} (P_{ring} R_{zring} - P_{zring} R_{ring}),$$

$$M_{mii} = \sum_{ring} (P_{ring} B_{ring} + P_{zring} B_{zring} + P_{ring} B_{sring}),$$

где R_{ring} , R_{zring} , R_{sring} - текущие значения проекций векторов \vec{R}_{ring} на оси системы $Oq\eta_1, \eta_2, \eta_3$ координат; P_{ring} , P_{zring} , P_{sring} - проекции вектора силы \vec{P}_{ring} , действующей на q -й зубец i -го венца i -й шарошки со стороны забоя на оси системы $Oq\eta_1, \eta_2, \eta_3$

координат; β_{1ng} , β_{2ng} , β_{3ng} - коэффициенты, зависящие от геометрических параметров долота и текущих значений обобщенных координат $U_g(t)$, $\theta_g(t)$, $\beta_i(t)$ долота.

В работе показаны пути замыкания системы уравнений (2.1) при помощи результатов теоретических и экспериментальных исследований, соответствующих определенным условиям работы долота и бурильной колонны. В результате получена следующая система уравнений, описывающая движение долота при бурении вертикальной скважины

$$\left. \begin{aligned} m_g \ddot{U}_g + \gamma_g \dot{U}_g &= A_i E_i \frac{\partial U_i(0,t)}{\partial x} + P_{igs}, \\ \alpha_g \ddot{\theta}_g + \sum_i (J_i \cos \psi_i \ddot{\beta}_i + \alpha_i \cos \psi_i \dot{\beta}_i) + \gamma_g \dot{\theta}_g &= G_i J_{pi} \frac{\partial \theta_i(0,t)}{\partial x} + M_{igs}, \\ J_i \ddot{\beta}_i + (\gamma_i + \alpha_i) \dot{\beta}_i + J_i \cos \psi_i \ddot{\theta}_g &= -h_i + M_{ini}, \quad i=1, 2, \dots, m, \end{aligned} \right\} (2.3)$$

где A_i , J_{pi} - площадь и полярный момент инерции сечения секции бурильной колонны, сопряженной с долотом; E_i , G_i - модуль упругости и модуль сдвига материала бурильной трубы, сопряженной с долотом; $U_i(0,t)$, $\theta_i(0,t)$ - осевое смещение и угол поворота сечения бурильной колонны, сопряженного с долотом; γ_g , γ_g - коэффициенты сопротивления осевому перемещению и вращению корпуса долота; γ_i , h_i - коэффициенты, определяющие момент трения в опоре i -й шарошки в зависимости от нагрузки и угловой скорости ее вращения; α_i - коэффициент сопротивления промывочной жидкости и шлама вращению i -й шарошки.

Полученные системы уравнений (2.1)-(2.3) позволяют установить взаимосвязи между инерционно-геометрическими характеристиками долота и кинематическими, а также динамическими параметрами его взаимодействия с забоем скважины и бурильной колонной в процессе бурения.

В третьей главе разработана аналитическая модель и алгоритм расчета взаимосвязанных продольных и крутильных колебаний сечений, колонны бурильных труб и шарошечного долота в процессе бурения вертикальной скважины роторным способом при следующих допущениях. Принято, что в процессе бурения оси вертикальной скважины и бурильной колонны совпадают, колонна бурильных труб находится в жидкости, сопротивление которой пропорционально скорости линейных и угловых смещений сечений колонны, вращение стола ротора происходит с постоянной угловой скоростью.

Положение любого сечения бурильной колонны в произвольный момент времени описано системой уравнений в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 U_K(x,t)}{\partial t^2} + \lambda_{1K} \frac{\partial U_K(x,t)}{\partial t} + g &= \alpha_{1K}^2 \frac{\partial^2 U_K(x,t)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 \theta_K(x,t)}{\partial t^2} + \lambda_{2K} \frac{\partial \theta_K(x,t)}{\partial t} &= \alpha_{2K}^2 \frac{\partial^2 \theta_K(x,t)}{\partial x^2} \end{aligned} \right\} (3.1)$$

где $U_K(x,t)$, $\theta_K(x,t)$ — продольное смещение и угол поворота вокруг оси скважины сечения K -й секции бурильной колонны с координатой x в момент времени t относительно его начального положения; λ_{1K} , λ_{2K} — коэффициенты затухания продольных и крутильных колебаний сечений K -й секции бурильных труб; g — ускорение свободного падения; α_{1K} , α_{2K} — скорости распространения продольных и крутильных колебаний в K -й секции бурильных труб.

В работе определены граничные условия в месте соединения долота с бурильной колонной при отсутствии и при установке наддолотного ВЗИ, а также при установке в сечениях бурильной колонны ВЗИ и опорно-центрирующих элементов. Определены начальные положение системы "шарошечное долото-бурильная колонна", а также начальные условия.

Полные величины линейных $U_k(x, t)$ и угловых $\theta_k(x, t)$ смещений сечений бурильной колонны представлены в виде

$$U_k(x, t) = W_k(x) + U_k(x, t), \quad (3.2)$$

$$\theta_k(x, t) = \omega_p \cdot t + \theta_k(x) + \varphi_k(x, t), \quad (3.3)$$

где ω_p - угловая скорость вращения ротора; $W_k(x)$, $\theta_k(x)$ - статические составляющие линейных и угловых смещений сечений бурильной колонны; $U_k(x, t)$, $\varphi_k(x, t)$ - динамические составляющие линейных и угловых смещений сечений бурильной колонны.

Функции $W_k(x)$ и $\theta_k(x)$ определены в работе.

Система уравнений для определения динамических составляющих линейных и угловых смещений сечений бурильной колонны и долота в процессе бурения вертикальной скважины представлена в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 U_k(x, t)}{\partial t^2} + \lambda_{1k} \frac{\partial U_k(x, t)}{\partial t} &= \Omega_k^2 \frac{\partial^2 U_k(x, t)}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial^2 \varphi_k(x, t)}{\partial t^2} + \lambda_{2k} \frac{\partial \varphi_k(x, t)}{\partial t} &= \Omega_k^2 \frac{\partial^2 \varphi_k(x, t)}{\partial x^2}, \\ m_g \ddot{U}_g + \gamma_g \dot{U}_g &= A_1 E_1 \frac{\partial U_1(0, t)}{\partial x} + P_{1gs}(t) - P_{em}, \\ \alpha_g \ddot{\theta}_g^{(g)} + \gamma_g \dot{\theta}_g^{(g)} + \sum_i J_{ki} \cos \psi_i \ddot{\beta}_i &= G_1 J_{p1} \frac{\partial \varphi_1(0, t)}{\partial x} + M_{1gs}(t), \\ J_{ki} \ddot{\beta}_i + \gamma_i \dot{\beta}_i + J_{ki} \cos \psi_i \ddot{\theta}_g^{(g)} &= -k_i + M_{kii}, \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} (3.4)$$

где P_{em} - статическая нагрузка на долото.

Средлены начальные и граничные условия для системы уравнений (3.4). Величины $P_{1gs}(t)$, $M_{1gs}(t)$, M_{kii} определяются из системы уравнений (2.2).

Таким образом, при моделировании движения системы "шарошечное долото-бурильная колонна" в процессе бурения учтено, что в момент времени $t=0$ сечение бурильной колонны, сопряженное со

столом ротора, начинает вращаться с угловой скоростью ω_p , а в момент времени $t'_0 = -\theta_g^{(e)}/\omega_p$, где $\theta_g^{(e)}$ — постоянный угол закручивания между сечением бурильной колонны, сопряженным со столом ротора и корпусом долота, возбуждение достигает долота и оно начинает вращаться с начальной угловой скоростью ω_p . В этот момент времени положение сечений бурильной колонны характеризуется функциями $W_k(x)$ и $E_k(x)$. Далее, при движении долота и взаимодействии его с забоем генерируются осевые $U_g(t)$ и угловые $\theta_g(t)$ колебания долота, которые распространяются вверх по бурильной колонне и описываются функциями $U_k(x, t)$, $\varphi_k(x, t)$.

При разработке алгоритма приближенного численного совместного решения систем уравнений (2.2) и (3.4) используется метод сеток, решение в точках области определения уравнений системы определяется шаг за шагом, исходя из граничных и начальных условий.

В работе приведены зависимости для определения шагов интегрирования Δt по времени и ΔX_{jk} , ΔX_{2k} по оси X бурильной колонны для численного интегрирования уравнений продольных и крутильных колебаний сечений бурильной колонны. Получены зависимости для определения численных значений $U_{g,j+1}$, $\theta_{g,j+1}$, $\beta_{i,j+1}$, $U_{k,j+1}$, $\varphi_{k,j+1}$ функций $U_g(t)$, $\theta_g(t)$, $\beta_i(t)$, $U_k(x, t)$, $\varphi_k(x, t)$ в момент времени $t = t'_0 + (j+1) \cdot \Delta t$, $j = 1, 2, \dots, N, \dots$, где s , m — номера сечений K -й секции бурильной колонны, при разбиении ее поперечными сечениями с шагом ΔX_{jk} и ΔX_{2k} соответственно. Численные значения климатических и динамических параметров взаимодействия вооружения шарошечного долота с забоем скважины в момент времени $t = t'_0 + j \cdot \Delta t$ определяются из системы уравнений (2.2).

Определив максимальное внедрение $Z_{inq \max}^{(k)}$ q -го зубца n -го венца i -й шарошки при K -м акте его взаимодействия с забоем скважины и пользуясь экспериментальной зависимостью объема лунки раз-

рушения породы от глубины внедрения зубца можно записать зависимость для вычисления механической скорости $U_{\text{мех}}$ бурения в виде

$$U_{\text{мех}} = \frac{\sum_{\text{вет}} \sum_{\text{шар}}^{K_{\text{инг}}} \frac{V_{\text{инг}}^{(k)}}{F \cdot T_{\text{б}}}}{F \cdot T_{\text{б}}}, \quad (3.5)$$

где F — площадь поперечного сечения скважины; $T_{\text{б}}$ — время работы долота; $K_{\text{инг}}$ — количество единичных актов взаимодействия q -го зубца n -го венца i -й шарошки с забоем за время $T_{\text{б}}$; $V_{\text{инг}}^{(k)}$ — объем лунки разрушения при K -м акте взаимодействия зубца с индексами i, n, q с породой.

В работе также приведены зависимости для прогнозирования проходки за рейс и стоимости одного метра проходки.

Таким образом, разработанная модель процесса бурения вертикальной скважины роторным способом позволяет проводить оценку комплексного влияния конструктивных параметров долота, компоновки бурильной колонны и параметров режима бурения на динамику системы "шарошечное долото-бурильная колонна" и на показатели эффективности углубления забоя.

В четвертой главе дана аналитическая оценка влияния параметров бурильного инструмента и режима бурения на работу шарошечного долота.

На основе разработанного алгоритма создана компьютерная программа и получены результаты расчета кинематических и динамических параметров движения системы "порода-шарошечное долото-бурильная колонна" в процессе бурения вертикальной скважины роторным способом, а также проведена оценка влияния параметров компоновки бурильной колонны и режима бурения на показатели эффективности процесса бурения.

При проведении вычислительного эксперимента принималась сле-

АНБ им. В. Сталина
АН УРСР

лучшая компоновка бурильного инструмента: долото Ш 295,3 С-ГВУ, утяжеленные бурильные трубы УБТ 229 - 9 м, УБТ 203 - 90 м, ТБПВ-140Х11 - 1000 м, буровая установка Уралмаш ЗД. В программе предусмотрена возможность установки над долотом ВЗИ, моделируемого вязко-упругим телом.

Порода на забое скважины представлена мелкозернистым слюдястым песчаником, использовались экспериментальные зависимости удельной силы сопротивления породы внедрению зуба клиновидной формы и объема разрушенной породы от глубины внедрения клиновидного зуба с площадью притупления 10x1 мм.

В результате реализации компьютерной программы рассчитывались следующие величины как функции от времени:

- траектория перемещения каждого зуба шарошек в породе;
- величина и направление силы, действующей на каждый зубец со стороны забоя;
- время контакта каждого зуба с забоем;
- мгновенная скорость вращения корпуса долота;
- мгновенная скорость вращения каждой из шарошек относительно цапфы долота;
- величина осевого смещения корпуса долота;
- динамические составляющие осевой силы и крутящего момента, действующие на долото со стороны бурильной колонны;
- суммарные величины и направления реакции и момента реакции забоя, действующие на долото;
- начальная механическая скорость и энергоемкость бурения.

При анализе результатов расчета использовались следующие показатели:

- коэффициент K_z неравномерности распределения нагрузки по зубцам венцов шарошки, представленный в виде

$$K_{zin} = Z_{in}^{max} / Z_{in}^{min}, \quad (4.1)$$

где Z_{in}^{max} , Z_{in}^{min} - максимальное и минимальное углубления зубцов n -го венца i -й шарошки в породу за время работы долота;

- коэффициент K_F загруженности венца шарошки во времени, представленный в виде

$$K_{Fzin} = \sum_{nq} t_{in} / t_{pg}, \quad (4.2)$$

где t_{pg} - время работы долота; $\sum_{nq} t_{in}$ - время контакта зубцов n -го венца i -й шарошки за время t_{pg} ;

Ψ - коэффициент гашения колебаний ВЗИ, представленный в виде

$$\Psi = A / A_0, \quad (4.3)$$

где A , A_0 - амплитуды продольных колебаний корпуса долота при работе с ВЗИ и без него соответственно;

- коэффициент K_g динамичности, представленный в виде

$$K_g = 1 + P_g^{max} / P_{ст}, \quad (4.4)$$

где P_g^{max} - максимальное значение динамической составляющей осевой нагрузки на долото; $P_{ст}$ - статическая нагрузка на долото.

Расчеты проводились при неизменных параметрах породы, долота и бурильной колонны. Исследовалось влияние параметров режима бурения, а также жесткости C_g наддолотного ВЗИ на кинематику и динамику системы "долото-бурильная колонна" и на показатели эффективности бурения. Установлено, что при бурении мелкозернистого слюдяного песчаника Долотом Ш 295.3 С-ГВУ при данной компоновке бурильной колонны и угловой скорости вращения ротора $4\mathcal{X}$ рад/с;

- с ростом статической нагрузки на долото от 100 до 200 кН коэффициенты K_{zin} уменьшаются в 1.5-2 раза, время контакта зубцов долота с забоем увеличивается на 5-10%, коэффициенты K_{zin} увеличиваются в 1.15-1.5 раза;

- при установке наддолотного ВЗИ жесткостью $1.5 \cdot 10^7$ Н/м и $P_{cm} = 200$ кН коэффициенты K_{zin} уменьшаются в 1.05-1.6 раза, величины вмятин зубцов уменьшаются на 10-15%, время контакта зубцов периферийных венцов шарошек с породой и коэффициенты K_{zin} увеличиваются на 10%, а для зубцов внутренних венцов уменьшаются на 10-15% по сравнению с данными, полученными при жесткой* компоновке низа буровой колонны.

- с ростом статической нагрузки на долото от 50 кН до 150 кН средняя угловая скорость вращения $\omega_{нр}$ первой шарошки долота возрастает от 11.8 рад/с до 16.4 рад/с, коэффициент K_g динамичности уменьшается от 2.85 до 1.6, а при дальнейшем росте P_{cm} до 200 кН $\omega_{нр}$ увеличивается незначительно до 16.7 рад/с, амплитуда и частота колебаний угловой скорости вращения первой шарошки увеличиваются в 1.17 и 1.28 раза соответственно, K_g увеличивается до 1.94;

- при изменении жесткости наддолотного ВЗИ от $0.8 \cdot 10^7$ Н/м до $3.5 \cdot 10^7$ Н/м и при $P_{cm} = 200$ кН изменение величины $\omega_{нр}$ происходит в пределах $\pm 3.5\%$ от значения $\omega_{нр}$ при жесткой компоновке низа буровой колонны, частота колебаний угловой скорости шарошки не изменяется, происходит уменьшение K_g в 1.75-1.9 раза по сравнению со значением K_g при жесткой компоновке низа буровой колонны, а изменение величины K_g происходит в диапазоне от 1.02 до 1.1;

жесткая* - без установленного над долотом ВЗИ.

- с ростом статической нагрузки на долото от 50 кН до 200 кН амплитуда и частота продольных колебаний корпуса долота возрастают от $2,2 \cdot 10^{-4}$ м до $4,4 \cdot 10^{-4}$ м и от 40 Гц до 52 Гц соответственно, происходит рост пиковых значений M_E^{max} момента сопротивления забоя вращению долота от 1800 Н·м до 4450 Н·м, а среднеинтегральное значение $M_{ср}$ момента сопротивления возрастает по зависимости, близкой к линейной от 282 Н·м до 1005 Н·м;

- с ростом жесткости наддолотного ВЗМ от $0,8 \cdot 10^7$ Н/м до $3,5 \cdot 10^7$ Н/м и при $P_{ст} = 200$ кН амплитуда продольных колебаний корпуса долота уменьшается от $2,7 \cdot 10^{-4}$ м до $2,1 \cdot 10^{-4}$ м, основная частота колебаний остается равной частоте при жесткой компоновке низа буровой колонны, происходит уменьшение значений M_E^{max} на 14-25%, а изменение величины $M_{ср}$ происходит в диапазоне $\pm 5\%$ от значения при жесткой компоновке низа буровой колонны;

- с ростом статической нагрузки на долото от 50 до 250 кН начальная механическая скорость $U_{мех}$ бурения возрастает по зависимости, близкой к линейной от 1.15 до 5.38 м/ч, а минимальная энергоёмкость A_v процесса бурения соответствует $P_{ст} = 100$ кН и равна $1,226 \cdot 10^8$ Н/м²;

- с ростом жесткости наддолотного ВЗМ от $0,8 \cdot 10^7$ Н/м до $1,5 \cdot 10^7$ Н/м и при $P_{ст} = 200$ кН начальная механическая скорость $U_{мех}$ бурения возрастает от 2.66 м/ч до 3.35 м/ч, а с дальнейшим увеличением жесткости до $3,5 \cdot 10^7$ Н/м происходит уменьшение $U_{мех}$ до 2.58 м/ч;

- при изменении жесткости наддолотного ВЗМ от $0,8 \cdot 10^7$ Н/м до $1,5 \cdot 10^7$ Н/м и $P_{ст} = 200$ кН минимальная энергоёмкость A_v процесса бурения соответствует $C_g = 1,5 \cdot 10^7$ Н/м; причем это значение на 30% превосходит величину A_v в случае жесткой компоновки низа

бурильной колонны.

Качественное и количественное сопоставление полученных расчетных зависимостей с экспериментальными данными, полученными при стендовых исследованиях и при бурении, дает основание полагать, что разработанная модель процесса углубления вертикальной скважины роторным способом хорошо воспроизводит физические явления, происходящие при взаимодействии шарошечного долота с забоем скважины и бурильной колонной.

В пятой главе намечены пути практического использования разработанной модели работы шарошечного долота.

На базе разработанных моделей представляется возможным создание компьютерных программ, позволяющих аналитическими методами решать следующие научно-практические задачи

1. Развитие научных основ проектирования шарошечных долот, а именно исследование влияния геометрии шарошек и их размещения относительно корпуса долота, типоразмера и размещения элементов вооружения на поверхности шарошек на кинематику и динамику взаимодействия элементов вооружения с породой, обладающей заданными механическими характеристиками и на эффективность углубления забоя, исследование нагруженности опор шарошек при различных комбинациях их геометрических параметров, размещении и типоразмере зубцов.

2. Обоснование параметров динамически согласованных компонентов бурильной колонны, а именно исследование влияния параметров компоновки бурильной колонны на кинематику и динамику взаимодействия вооружения шарошечного долота данной конструкции с породой, обладающей заданными механическими характеристиками, подбор типоразмера и длины секций УБГ, места установки и характеристик ВЗИ.

продольных и крутильных колебаний для обеспечения наиболее эффективного процесса углубления скважины.

3. Совершенствование проектирования режима бурения, а именно исследование влияния параметров режима бурения на кинематику и динамику взаимодействия вооружения шарошечного долота с породой, поиск оптимальных параметров режима бурения, обеспечивающих наиболее эффективную работу буровой системы "шарошечное долото-бурильная колонна-буровая вышка" с заданными конструктивными и физическими параметрами при бурении породы с данными механическими характеристиками.

По нашему мнению выбор оптимального режима бурения при использовании шарошечного долота данной конструкции необходимо проводить совместно с подбором параметров компоновки бурильной колонны, оценивая их комплексное влияние на показатели эффективности процесса углубления скважины.

Аналитическая модель процесса бурения вертикальной скважины роторным способом, компьютерная программа и результаты численного эксперимента использовались в 1990-1992 гг. для совершенствования расчетных моделей работы буровых механических систем при выполнении хозяйственной тематики в научно-исследовательском секторе Ивано-Франковского института нефти и газа. Соискателем уточнены расчетные схемы, проведена оценка величин динамических сил и моментов, а также линейных и угловых смещений сечений бурильной колонны, оценена эффективность применения БЗК различной жесткости в компоновке низа бурильной колонны.

Разработанная модель работы шарошечного долота, компьютерная программа и результаты проведенного соискателем численного эксперимента переданы Дрогобычскому долотному заводу для

использования при проектировании вооружения шарошечных долот.

В настоящее время накапливаются данные для сопоставления расчетных и фактических результатов обработки долот III 295.3 СТ с различными характеристиками вооружения, что даст возможность ввести корректировочные коэффициенты для приближения результатов прогнозных расчетов к фактическим, т.е. позволит более обоснованно принимать решения по оптимизации процесса бурения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана новая методика математического моделирования работы шарошечного долота, учитывающая основные закономерности взаимодействия его вооружения с забоем скважины и позволяющая установить новые зависимости для определения кинематических и динамических параметров движения долота в процессе бурения.

2. Получены новые системы дифференциальных уравнений, описывающие движение шарошечного долота в процессе бурения произвольно направленной скважины и движение буровой системы "шарошечное долото-буровая колонна-буровая вышка" при бурении вертикальной скважины роторным способом, учитывающие механические характеристики разбуриваемой породы, конструктивные параметры долота и буровой колонны, параметры режима бурения и позволяющие исследовать кинематику и динамику взаимодействия шарошечного долота с забоем, определять параметры взаимосвязанных продольных и крутильных колебаний сечений буровой колонны, оценивать влияния конструктивных и физических характеристик буровой системы на эффективность процесса бурения.

3. Разработаны алгоритмы приближенного численного решения совместной системы дифференциальных уравнений движения шарошечного

долота и бурильной колонны в процессе бурения вертикальной скважины роторным способом и на его основании создана и рекомендована для практического использования компьютерная программа, позволяющая определять численные значения кинематических и динамических параметров движения буровой системы, оценивать показатели эффективности бурения. Впервые получены расчетные зависимости параметров траекторий перемещения зубцов шарошечного долота в породе, осевого смещения корпуса долота, угловой скорости вращения шарошек, динамической осевой нагрузки на долото, момента сопротивления забоя вращению долота, начальной механической скорости проходки и энергоемкости разрушения породы при различных параметрах режима бурения и жесткости компоновки нива бурильной колонны.

4. При оценке влияния параметров режима бурения на кинематику и динамику буровой системы "долото-бурильная колонна-буровая вышка", установлено, что при бурении песчаника долотом Ш 295.3 С-ГВУ при данной компоновке бурильной колонны, угловой скорости вращения ротора 4π рад/с с ростом статической нагрузки $P_{ст}$ на долото от 50 кН до 200 кН коэффициенты $K_{кз}$ неравномерности распределения нагрузки по зубцам венцов шарошек уменьшаются, время контакта зубцов с забоем увеличивается, коэффициенты $K_{зв}$ загруженности венцов шарошек во времени возрастают, средняя угловая скорость вращения первой шарошки долота увеличивается, коэффициент динамичности K_d уменьшается, достигая минимального значения при $P_{ст} = 150$ кН, а при дальнейшем росте $P_{ст}$ - увеличивается, амплитуда и основная частота продольных колебаний корпуса долота возрастают, происходит рост пиковых значений момента сопротивления забоя вращению долота, а среднее значение момента сопротивления вращению долота при росте $P_{ст}$ возрастает по зависимости близкой

к линейной.

5. При исследовании влияния жесткости компоновки низа буровой колонны на изменение кинематических и динамических параметров движения буровой системы, установлено, что при бурении песчаника долотом Ш 295.3 С-ГВУ при данной компоновке буровой колонны, угловой скорости вращения ротора 4 М рад/с , статической нагрузке 200 кН на долото

- при установке наддолотного ВЗИ жесткостью $C_g = 1,5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$ коэффициенты $K_{\text{вн}}$ неравномерности распределения нагрузки по зубцам венцов и величины максимального внедрения зубцов в породу уменьшаются, время контакта зубцов периферийных венцов шарошек и коэффициенты $K_{\text{вн}}$ загруженности венцов во времени увеличиваются, а для внутренних венцов уменьшаются по сравнению с данными, полученными при жесткой компоновке низа буровой колонны;

- при изменении жесткости наддолотного ВЗИ от $0,8 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$ до $3,5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$, сравнивая исследуемые параметры с их значениями, полученными при жесткой компоновке низа буровой колонны, средняя угловая скорость вращения первой шарошки долота практически не изменяется, происходит значительное уменьшение коэффициента динамичности и амплитуды продольных колебаний корпуса долота, основная частота колебаний не изменяется, пиковые значения момента сопротивления забоя вращению долота уменьшаются, а среднее значение момента сопротивления изменяется незначительно.

6. При оценке влияния параметров режима бурения и жесткости компоновки низа буровой колонны на показатели эффективности углубления забоя, установлено, что при бурении песчаника долотом Ш 295.3 С-ГВУ при данной компоновке буровой колонны и скорости вращения ротора 4 рад/с с ростом статической нагрузки $P_{\text{ст}}$ на до-

долота от 50 кН до 250 кН начальная механическая скорость бурения возрастает по зависимости близкой к линейной, минимальное значение энергоемкости разрушения забоя достигается при $P_{cm} = 100$ кН; с изменением жесткости C_g наддолотного ВЗИ от $0,8 \cdot 10^7$ Н/м до $3,5 \cdot 10^7$ Н/м при $P_{cm} = 200$ кН максимальное значение начальной механической скорости бурения и минимальная энергоемкость разрушения забоя соответствуют $C_g = 1,5 \cdot 10^7$ Н/м, однако происходит уменьшение начальной механической скорости бурения и увеличение энергоемкости разрушения забоя по сравнению с их значениями при жесткой компоновке низа буровой колонны.

7. Качественное и количественное сопоставление расчетных зависимостей изменения величин углубления зубцов долота в породе, угловой скорости вращения шарошек, осевого смещения корпуса долота, динамической осевой силы на долоте, момента сопротивления забоя вращению долота, начальной механической скорости бурения и энергоемкости разрушения забоя с экспериментальными данными, полученными при стандовых и промышленных исследованиях, дает основание полагать, что разработанные модели работы шарошечного долота и процесса бурения вертикальной скважины роторным способом хорошо воспроизводят физические процессы, происходящие при углублении забоя скважины.

8. Создана теоретическая основа для разработки компьютерных программ, позволяющих аналитическими методами решать широкий круг задач проектирования шарошечных долот, определять оптимальное сочетание параметров компоновки буровой колонны и режима бурения, обеспечивающее наиболее эффективное углубление забоя скважины.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Векерик В.И., Молдавцев С.А., Пицк Р.Л. Математическая модель колебаний сечений бурильной колонны с упруго-вязкими связями. Ивано-Франковск. 1988. - 11с. - Деп. в УкрНИИТИ 15.08.88. № 1938.

2. Векерик В.И., Молдавцев С.А., Пицк Р.Л. Математическая модель взаимодействия элементов вооружения шарошечного долота с упругим забоем. Ивано-Франковск. 1989. - 18с. - Деп. в УкрНИИТИ 08.06.89. № 1565.

3. Векерик В.И., Молдавцев С.А. Исследование закономерностей взаимодействия вооружения шарошечного долота с забоем при изменении свойств пород и параметров компоновки бурильной колонны // Разрушение горных пород при бурении скважин: Тез. докл. У Всесоюз. науч.-техн. конф. - Уфа, 1990. Т.3, с.130-133.

4. Молдавцев С.А., Векерик В.И. Дифференциальные уравнения движения шарошечного долота при углублении забоя. Ивано-Франковск. 1991. - 26с. - Деп. в УкрНИИТИ 12.06.91. № 897.

5. А.с. СССР № 1721206. Амортизатор шпинделя турбобура/
Векерик В.И., Гайдич В.В., Бик Е.И., Молдавцев С.А., Червак З.Д.
-4 с.: ил.

6. Молдавцев С.А., Векерик В.И. Прогнозирование динамичности и эффективности работы шарошечного долота // Методы и средства технической диагностики: Сборник материалов II-й межвузовской школы-семинара. - Ивано-Франковск: МП "Контакт", 1992.

Соискатель *С.А. Молдавцев* С.А. Молдавцев

Государственный архив Республики Беларусь
Информация о документах: 01010001, 4-я серия: 00004, 10, объект - 10, д.л.
Лит. 011, стр. 100.

1. Велюк В.И., Молдавец С.А., Вино Р.А. Исследование
влияния колебаний скорости бурения на процесс формирования
защитной пленки. Ивано-Франковск, 1988. - 110 - Стр. в УкрБЮМН. 1988. № 1.
в 1988.

2. Велюк В.И., Молдавец С.А., Вино Р.А. Исследование
влияния колебаний скорости бурения на процесс формирования
защитной пленки. Ивано-Франковск, 1988. - 110 - Стр. в УкрБЮМН.
№ 06.89. в 1988.

3. Велюк В.И., Молдавец С.А. Исследование закономерностей
формирования защитной пленки в процессе бурения при
изменении скорости бурения и диаметра скважины. // Разработки
технологий бурения скважин. Тез. докл. Укр. акад. наук. - Киев, 1990. Т. 2. - С. 174-175.

4. Молдавец С.А., Велюк В.И. Дифференциальное уравнение
движения поршневого насоса при угловом движении. Ивано-Франковск.
1991. - 260 - Стр. в УкрБЮМН. № 1. в 1991.

5. А.С. ОКР в ГИИХИ. Автоматизированная турбобура/
Велюк В.И., Галдык В.В., Вино Р.А., Молдавец С.А., Чарман З.Д.
- 4 с. ил.

Зак. 611, тпр. 100. Велюк В.И. Автоматизированная турбобура
Подписано к печати 6.10.1992, ф-т бумаги 60x84 ^{1/16}, объем - 1,0 в.л.
Отдел оперативной полиграфии ОУС, г. Ивано-Франковск, ул. Панфиловцев, 6.
Кредитная технология диагностики: Сборник материалов II-й меж-
дународной школы-семинара. - Ивано-Франковск: ИИ "Аспект", 1992.

Секретарь *С.А. Молдавец* С.А. Молдавец

468552

AB 25.972