

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-6-9-20

УДК 622.24

**Ф.А. Агзамов, И.Д. Мухаметгалиев** (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

## **СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ КОМПОНОВКИ НИЗА БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫМ БУРЕНИЕМ СКВАЖИН**

**Farit A. Agzamov, Ilmir D. Mukhametgaliev** (Ufa State  
Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

## **DECISION SUPPORT SYSTEM OF DESIGNING BOTTOM-HOLE ASSEMBLY FOR DIRECTIONAL WELL DRILLING**

### **Введение**

Рассматриваются вопросы разработки системы поддержки принятия решений (СППР) для формирования компоновки низа бурильной колонны (КНБК) в процессе управления бурением наклонно-направленных и горизонтальных скважин (ННГС) и программного обеспечения, реализующего данную СППР. СППР включает в себя экспертную систему (ЭС), базу знаний, блоки аналитики и моделирования, базу данных бурового оборудования. Блоки аналитики и моделирования содержат процедуры расчета оптимальных для заданной скважины параметров КНБК по результатам бурения исходя из требований к профилю скважины, механической скорости проходки (МСП) и уменьшения прихватаопасности. Обсуждаются способы применения ЭС в составе автоматизированной системы оперативного управления бурением ННГС.

Исследуется состав применяемого забойного бурового оборудования: долота, калибраторы лопастные спиральные, винтовые забойные двигатели, бурильные ясы, утяжеленные бурильные трубы и трубы бурильные толстостенные.

### **Background**

The authors study the development of decision support system (DSS) for designing the bottom-hole assembly (BHA) while drilling, as well as the development of software that implements the DSS. DSS includes expert system, knowledge base, analytics and modeling subsystem, database of drilling equipment. The analytics and modeling subsystems contain algorithms for drilling calculation of the optimal BHA parameters in accordance with the requirements for the well profile, rate of penetration and reduction of sticking danger. The authors discuss how to use the developed expert system as part of an automated control system for directional well drilling.

The studied drilling equipment consists of: drill bits, calibrators, downhole screw motors, drilling jar, heavy-weight drill pipes and heavy-wall drill pipes.

Анализируется информация об основных параметрах бурового оборудования, влияющих на прихватоопасность, формирование траектории скважины и обеспечение необходимой МСП. Формируется структура базы данных бурового оборудования, используемых для расчета вышеописанных параметров.

Результатом работы, выполненной с использованием программного обеспечения СППР, является формирование отчета, задающего состав наименований и последовательность установки экземпляров необходимого забойного бурового оборудования.

#### **Цели и задачи**

Для реализации СППР для формирования КНБК в процессе управления бурением ННГС разработать ЭС, базу знаний, блоки аналитики и моделирования, а также базу данных бурового оборудования, работающих в составе автоматизированной системы оперативного управления бурением наклонно-направленных и горизонтальных скважин.

#### **Результаты**

Представлены онтологическая модель описания и выбора успешных решений формирования КНБК, разработанная в программе Protégé на основе результатов оценки и анализа основных атрибутов опыта выбора КНБК, а также структура базы данных бурового оборудования, на основании которой по результатам дедуктивного вывода в соответствии с решающими правилами базы знаний производится выбор соответствующего оборудования КНБК.

Analyzed the main parameters of drilling equipment affect sticking danger, rate of penetration and well trajectory. The developed database structure of drilling equipment allows you to calculate the above parameters.

The result of the work of the decision-making software is a report defining the types and sequence of installation of the necessary downhole drilling equipment.

#### **Aims and Objectives**

For DSS development for the BHA designing while drilling is necessary to develop an expert system, a knowledge base, analysis and modeling subsystem, a database of drilling equipment to implement this DSS as a part of an automated control system for directional well drilling.

#### **Results**

The authors developed an ontological model for describing and choosing effective BHA design by the Protégé software based on evaluation and analysis of the main attributes of BHA selection experience. The authors also developed the drilling equipment database structure for BHA equipment selection based on deductive inference mechanism for decision rules of the knowledge base.

---

---

**Ключевые слова:** база данных бурового оборудования; система поддержки принятия решений; компоновка низа бурильной колонны; экспертная система; онтологическая модель; диаграмма «Сущность - Связь»

---

---

**Key words:** database of drilling equipment; decision support system; bottom hole assembly; expert system; ontological model; Entity - Relationship diagram

---

---

#### *Введение*

Опыт ведущих компаний в области бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин (ННГС) показывает,

что актуальным направлением автоматизации процессов бурения является применение экспертных знаний и опыта узкопрофилированных специалистов, значительно повышающих технико-экономическую

эффективность строительства ННГС, что в конечном итоге существенно повышает рентабельность эксплуатации скважин.

Ошибки, допущенные при бурении ННГС, проявляются не только на этапах эксплуатации и ремонта скважин (снижение продуктивности скважин, затруднение работы насосного оборудования и пр.), но начинают приносить ущерб уже на самом этапе строительства скважин (учащение прихватов, затруднение ориентирования компоновки низа бурильной колонны и пр.). Означенные ошибки, как правило, связаны с некорректным принятием решений по бурению ННГС по причинам дефицита априорной и оперативной информации, применения неточных методов управления бурением, недостаточной квалификации нового персонала и др.

В данной ситуации автоматизация процессов управления строительством ННГС призвана повысить качество управления на основе применения более сложных и точных методов управления, не последнюю роль в решении данных проблем играют различные тренажеры [1]. При этом окончательный выбор управляющих решений обычно остается за лицом, принимающим решение, а основой автоматизированной системы оперативного управления направленным бурением является система поддержки принятия решений (СППР) [2], базирующаяся на знаниях экспертов, методах поиска оптимального управления, методах выбора структуры и идентификации моделей движения КНБК, методах прогнозирования траектории ННГС, методах формирования структур компоновки низа бурильной колонны (КНБК), методах управления режимами бурения и составом буровой промывочной жидкости и пр. Многие ошибки на системном уровне также связаны с недостаточной проработанностью предметной области принятия решений при управлении процессом бурения скважин, в том числе слабой разработанностью онтологии поддержки принятия решений в данной области [3].

Особое внимание при формировании КНБК уделяется выбору долот, этому вопросу посвящено большое количество работ [4-9].

Выбор долота проводится по его основным параметрам (длина и форма долота, количество лопастей, форма, размер и количество режущих зубьев и пр.) и зависит от множества факторов: вибрация, плотность среды бурения, требуемая механическая скорость проходки (МСП), профиль и конечная глубина скважины (секция под колонну), тип забойной телеметрической системы (MWD или RSS), цель применения (шаблонирование, бурение, срезка с цементного моста) и пр.

Так, для оперативности получения данных о применяемом долоте было предложено использовать программное обеспечение, выполненное как мобильное приложение [10]. Данное программное обеспечение содержит алгоритм расчета эффективности применения долота с привязкой к конкретному месторождению. Для оценки эффективности анализируется информация о МСП, производительности насосов, частоте вращения, параметрах профиля скважины. Такой подход к оперативному поиску требуемого типа долота упрощает его выбор и повышает эффективность выполнения буровых работ при акцентировании внимания на конкретную задачу: снижение риска сальникообразования, управление КНБК, бурение с максимально возможной МСП и пр.

Разработка большого количества моделей работы долота вызвала необходимость имитационного анализа [11], после выполнения которого были получены точные параметры эксплуатации долота, а также информация о рисках в процессе бурения. Информация о рисках сопровождалась рекомендациями по модернизации конструкции. Симулятор по выбору долот был разработан учеными из государственного университета в г. Колорадо (США) на основе уже имеющихся моделей по абразивному износу.

Большим преимуществом данного симулятора является возможность ввода эмпирических результатов выполненных буровых работ, который коррелирует не только работу симулятора, но и сами зависимости, влияющие на модели.

Учеными был предложен новый способ оценки эффективности применения долот путем ввода понятия «индекс долота» [12]. Принцип выполняемой работы, которая влияет на индекс, заключается в испытании в стендовых условиях экземпляра долота. Испытание производится с учетом геотехнических и геомеханических условий залегания пластов, бурение в которых и ожидается на конкретном месторождении. Каждая марка долота получает свой индекс качества, после которого становится очевидным необходимость применения того или иного вида долота.

Большой интерес представляют работы, связанные с исследованием влияния конфигурации КНБК на возникновение и пагубное воздействие вибраций в ней с использованием теории конечных элементов [13].

Разработанное программное обеспечение позволяет подобрать конфигурацию КНБК, обеспечивающую более эффективное бурение для случаев стандартного роторного бурения, бурения с использованием винтовых забойных двигателей и роторно-управляемых систем. Проведенные испытания показали эффективность разработанного метода, поскольку его применение позволило значительно снизить уровень вибраций, повысить эффективность передачи механической энергии на долото и снизить стоимость одного метра бурения.

Разработано большое количество программных продуктов, помогающих решать различные задачи конфигурирования КНБК. Так, разработано программное обеспечение [14], позволяющее обеспечить оптимальную конфигурацию и работу КНБК по требуемым показателям интенсивности искривления (в том числе на участке резки), частотам вращения и пр., при этом минимизируя вибрации и механические нагрузки на роторно-управляемые системы, повышая точность измерения во время бурения за счет более точного учета несоосности MWD-сенсора и ствола скважины и пр.

Специалистами компании Schlumberger большое внимание уделяется вопросам

разработки и использования экспертной системы по выбору конфигурации КНБК для колтюбинга, актуальность применения которой продиктована необходимостью конфигурирования сложных КНБК, нацеленных на специализированные задачи [15]. Широкое применение подобной экспертной системы (ЭС) позволит более эффективно использовать человеческий капитал и накопленные в компании знания без дополнительного трудо- и времязатратного обучения специалистов.

Компания «Бейкер Хьюз» разработала ЭС по выбору бурильных долот, работа над которой велась более 10 лет [16]. Данная ЭС по выбору бурильных долот содержит в своем составе отдельные базы знаний по выбору различных типов долот: PDC, TCI, STI, Impregnated. Исходной информацией для выбора долот являются данные литологии и гамма-каротажа, плотность бурового раствора, поровое давление, время пробега продольной волны в породе, предполагаемые частота вращения, усилие и интервал бурения долота. На основе исходной информации формируются основные атрибуты ЭС по выбору бурильных долот: предел прочности при неограниченном сжатии, прочность долота, абразивность среды, механическая стойкость долота, текущая МСП, а также средняя МСП для долота. Далее основные и некоторые дополнительные атрибуты, а также данные по скважинам поступают в блок логического вывода, по которым ЭС по выбору бурильных долот определяет параметры рекомендуемых долот: режущую структуру, тип подшипника, тип уплотнения и пр.

ЭС по выбору бурильных долот имеет развитую подсистему разработки сценариев типа «что - если», а также сценариев непредвиденных ситуаций в процессе планирования бурения или при отклонении процесса бурения от планируемого. Авторы подтверждают возможность увеличения срока эксплуатации долот типа TCI до 33 %.

Обязательным атрибутом СППР бурения на сегодняшний день является база данных по пробуренным и бурящимся скважинам [17].

Ведение базы данных необходимо и для решения задач более точного формирования КНБК исходя из опыта ранее пробуренных скважин.

*Подходы к разработке методов принятия решений при формировании КНБК*

На основе результатов оценки и анализа основных атрибутов опыта выбора КНБК в программе Protégé [18] была разработана онтологическая модель, приведенная на рисунке 1, для описания и выбора успешных решений формирования КНБК в составе автоматизированной системы оперативного управления направленным бурением.

Онтология описания принятия решений по формированию программы управления разработана таким образом, чтобы отобразить множество классов формирования КНБК, связанных с решением различных задач, возникающих в процессе управления бурением скважин.

Онтологическая модель формирования программы управления, являющаяся фрагментом онтологической модели управления бурением скважин, разделяет признаки сформированной программы управления, описывающие сформированную КНБК, технологические режимы бурения, последовательность выполнения технологических операций, прогнозируемую траекторию на текущее долбление и другие специфичные для данной предметной области.

Формирование КНБК является одной из важных задач автоматизация процессов управления бурением ННГС, которая, в основном, решается на этапе проектирования куста скважин, но также возможен возврат к данной задаче непосредственно в процессе бурения, что может быть обусловлено необходимостью формировать необходимую траекторию скважины, оптимизировать механическую скорость бурения, а также снижать прихватоопасность КНБК.



Рисунок 1. Фрагмент онтологической модели

При этом формирование новой КНБК может происходить как в ходе плановых спуско-подъемных операций колонны бурильных труб, связанных с бурением по секциям скважины, необходимостью бурения боковых стволов, включением в состав телесистемы КНБК забойного резистивиметра и пр., так и в ходе внеплановых спуско-подъемных операций, проводимых в связи с означенными задачами.

По этой причине автоматизированная система оперативного управления направленным бурением должна включать в свой состав модуль, осуществляющий формирование КНБК непосредственно в процессе оперативного управления ННГС.

К задаче формирования КНБК предъявляются требования обеспечения формообразования скважины, необходимой скорости проходки и уменьшения прихватоопасности.

Основными факторами, влияющими на формирование необходимой КНБК являются: требуемая кривизна или интенсивности искривления азимутального и зенитного углов, параметры текущего участка скважины, ожидаемые характеристики разбуриваемых пород, параметры геолого-технического наряда и пр. В процессе формирования КНБК приходится учитывать не только хорошо формализованные процедуры выбора составных частей и структуры КНБК, но и эмпирические знания технологов, базирующиеся на их богатом производственном опыте, и позволяющие более «тонко настраивать» КНБК в условиях высокой степени неопределенности их поведения в процессе бурения.

Тем не менее, оперативное управление бурением скважин по проектному профилю со сформированной КНБК осуществляет следящая система управления, которая может быть построена со специально настроенным пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором [19] или на основе использования прогнозирующих моделей [20].

В этом случае модуль формирования КНБК в составе автоматизированной

системы оперативного управления направленным бурением целесообразно строить в классе ЭС, позволяющих не только выбирать состав и структуру КНБК в режиме диалога с оператором, объяснять предлагаемые варианты и изменять их в процессе диалога, но и формировать КНБК в полностью автоматическом режиме.

Такая ЭС формирования КНБК должна содержать:

- базу знаний;
- подсистему обучения, реализованную в виде имитационного тренажерного комплекса для обучения практическим навыкам бурения [21];
- подсистему объяснения;
- механизм логического вывода, реализующий дедуктивный вывод, основанный на методе резолюций;
- интерфейс ввода-вывода данных для сопряжения с другими программными модулями, реализующими функции оперативного управления бурением, в том числе, идентификацию параметров формообразования, механической скорости проходки и прихватоопасности КНБК;
- графический пользовательский интерфейс.

Данная ЭС может применяться непосредственно в процессе оперативного управления ННГС при невозможности выполнения текущей КНБК требований формообразования.

*Разработка и оценка эффективности системы поддержки принятия решений при формировании КНБК*

Рассмотрим особенности реализации предлагаемой ЭС для формирования КНБК. В базе знаний прототипа данной ЭС используются простые решающие правила и дедуктивный вывод, основанные на ведении базы данных бурового оборудования и применении процедур-методов вычисления параметров КНБК.

Вопросы заполнения базы знаний ЭС и работу подсистемы объяснения планируется рассмотреть в следующей статье.

Для разработки базы данных бурового оборудования необходимо рассмотреть основные составляющие КНБК, влияющие на формообразование, механическую скорость проходки и прихватоопасность, и которыми являются: долото, калибраторы лопастные спиральные (КЛС), винтовые забойные двигатели (ВЗД), бурильный яс, утяжеленные бурильные трубы (УБТ) и трубы бурильные толстостенные (ТБТ).

*Основными факторами, определяющими выбор параметров верхних элементов КНБК* (промежуточные стальные бурильные трубы (СБТ), УБТ, буровой яс, ТБТ), являются:

- плановые интенсивности искривления траектории скважины;
- диаметр бурящейся секции;
- график проведения плановых спуско-подъемных операций;
- идентифицированные параметры многорежимной модели движения КНБК и пр.

При этом *основными параметрами бурового оборудования, влияющими на формообразование*, являются:

- долото: тип, номинальный диаметр и количество лопастей;
- КЛС: номинальный диаметр и длина, количество в составе КНБК (1, 2 или 3), положение установки;
- ВЗД: длина искривленного плеча от долота до регулировочного узла угла перекоса, его номинальный диаметр, угол искривления на регулировочном узле, а также жесткостные характеристики;
- УБТ: длина и номинальный диаметр;
- ТБТ: длина и номинальный диаметр.

Основными же параметрами *бурового оборудования, влияющими на механическую скорость проходки*, являются:

- долото: тип, номинальный диаметр, количество лопастей, диаметр гидромониторных отверстий;
- КЛС: номинальный диаметр, количество лопастей, длина, количество в составе КНБК (1, 2 или 3);
- ВЗД: длина искривленного плеча от долота до регулировочного узла угла

перекоса, его номинальный диаметр, заходность и количество ступеней силовой секции;

- УБТ: длина и номинальный диаметр;
- СБТ: длина и номинальный диаметр.

В качестве *основных параметров бурового оборудования, влияющих на прихватоопасность*, необходимо рассмотреть:

- долото: номинальный диаметр, диаметр гидромониторных отверстий;
- ВЗД: номинальный диаметр, количество ступеней, характеристики допустимой деформации;
- КЛС: номинальный диаметр, количество лопастей, количество в составе КНБК (1, 2 или 3);
- яс: величина преобразованной поступательной энергии, характеристики допустимой деформации;
- ТБТ: номинальный диаметр, характеристики допустимой деформации.

Означенные атрибуты являются основной информацией при ведении базы данных бурового оборудования, используемой для идентификации параметров формообразования, механической скорости проходки и прихватоопасности.

Для формирования КНБК разрабатываемая ЭС использует базу данных бурового оборудования по типам и экземплярам имеющегося бурового оборудования, фрагмент диаграммы «Сущность - Связь» для которой приведен на рисунке 2.

Особенностью данной структуры является состав сущности типов КНБК (на рисунке 2 не приведен), используемых в составе сущности экземпляров КНБК, что отражает специфику применения предлагаемой базы данных бурового оборудования совместно с ЭС [22].

Как было сказано, в ходе формирования КНБК ЭС взаимодействует с вычислительными процедурами, осуществляющими расчеты требуемых значений основных параметров оборудования КНБК и составляющих основу блоков аналитики и моделирования СППР.

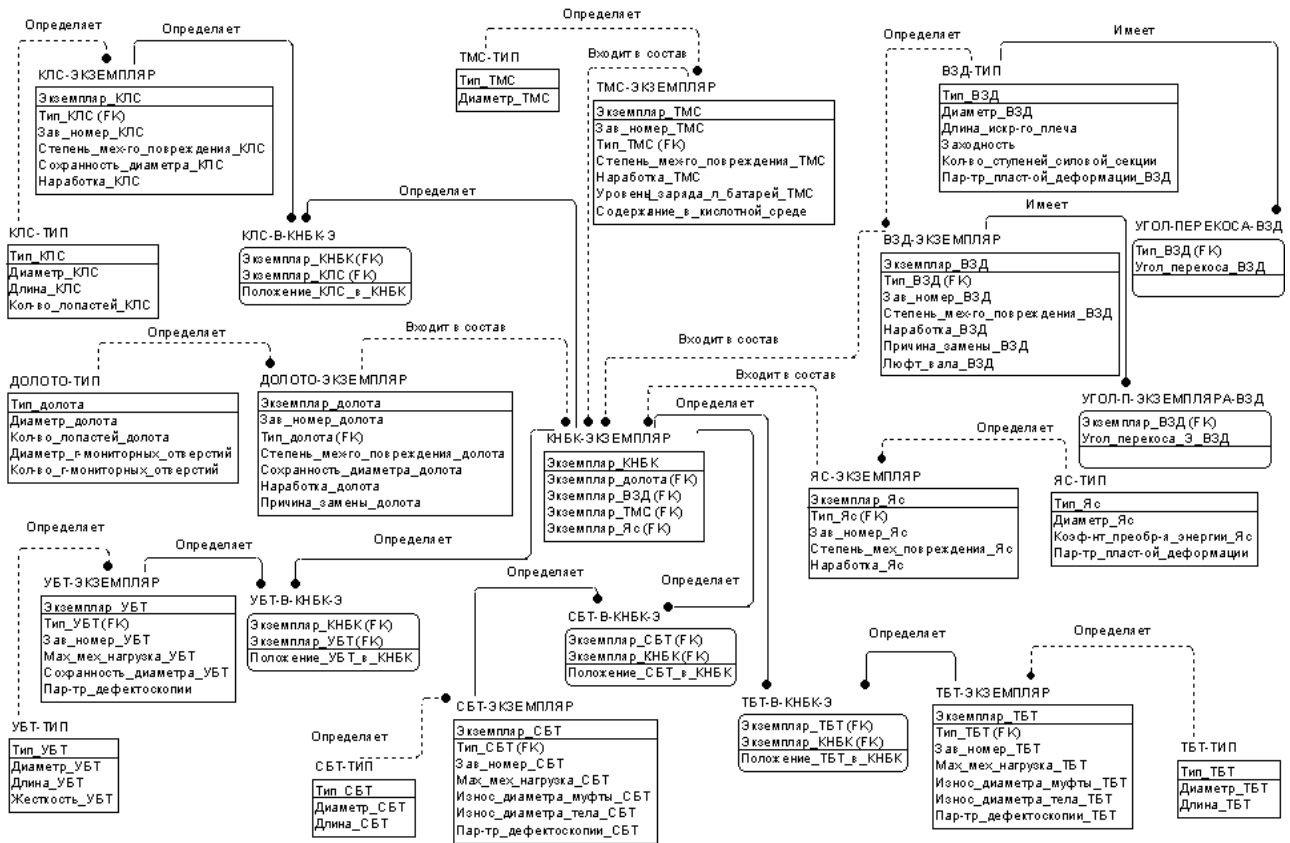


Рисунок 2. Фрагмент диаграммы «Сущность - Связь» для базы данных бурового оборудования

Приведем перечень основных из них:

- долото: расчеты суммарной площади гидромониторных насадок, количества лопастей, диаметра и угла атаки вооружения;
- КЛС: расчеты степени изменения формообразования скважины в зависимости от количества установок и их размещения, площади калибрующей части стенки скважины, числа лопастей, типа геометрии лопастей;
- ВЗД: расчеты заходности рабочей пары «ротор - статор», энергетических характеристик (мощности и длины силовой секции), номинального диаметра, угла искривления на регулировочном узле, диаметра

центрирующих элементов (стабилизаторов), длины искривленного плеча от долота до регулировочного узла угла перекоса;

- УБТ: расчеты жесткостных характеристик, инерционной скорости;
- яс: расчеты величины необходимой осевой нагрузки для преобразования поступательного движения бурильной энергии в кинетическую энергию, минимального диаметра проходного сечения (для возможности извлечения ТМС), длины шлицевого вала (рабочая длина яса);
- СБТ: расчеты характеристик допустимой деформации, общей длины;



- ТБТ: расчеты номинального диаметра, характеристик допустимой деформации, инерционной скорости, общей длины.

После вычислений проводится выбор соответствующего оборудования КНБК из базы данных по результатам дедуктивного вывода в соответствии с решающими правилами базы знаний.

Рассмотрим пример формирования КНБК с помощью ЭС, которая применялась подрядной компанией, оказывающей технико-технологический сервис с применением забойной телеметрической системы, на Малобалыкском месторождении.

КНБК имела следующую конфигурацию: Долото PDC БИТ-220.7 ВТ 613 УСВ.323-01.000ФО №27637+ДРУ 7LZ178Сх7.0LI 7/8 (1°44') №P77-263+ПК-178 №2016-02-06+Переводник П-3-133/3-147 №3+УВНО 6 3/4(172) №UB 650-143+УБТН-А-172 Т/С "Tensor" №0006+СБТ-127×9,19 S-135 №07-16 12св.+Яс RDT-2НМ-172 №НМJ-675-009+СБТ-127×9,19 S-135 №07-16.

В ходе формирования данной КНБК предлагаемая ЭС выбрала тип ВЗД (7LZ178Сх7.0LI 7/8) и значение угла перекоса его регулировочного узла (1°44') на основе следующих решающих продукций базы знаний:

- если [Кол-во\_лопастей\_долота = 6] и [Частота\_вращения\_долота\_ном < 200] и [Длина\_необсаженного\_интервала > 2000], то [заходность = 7/8];

- если [заходность = 7/8] и [Мах\_перепад\_давления < 87], то [Число\_шагов\_силовой\_секции = 5,7];
- если [Требуемая\_кривизна = 0,249] и [Диаметр\_скважины = 220,7] и [Требуемая\_частота\_вращения\_БК > 40], то [Угол\_перекоса\_ВЗД = 1°44'].

Приведенный пример демонстрирует эффективность работы ЭС формирования КНБК. Планируется доработать механизм принятия решений на основе байесовских оценок, что позволит ЭС ранжировать предлагаемые варианты формирования КНБК.

Данную ЭС планируется реализовать в виде прикладного программного обеспечения в составе автоматизированной системы оперативного управления направленным бурением.

#### Выводы

По результатам данной работы представлены: онтологическая модель описания и выбора успешных решений формирования компоновки низа бурильной колонны, разработанная в программе Protégé на основе результатов оценки и анализа основных атрибутов опыта выбора КНБК, а также структура базы данных бурового оборудования, на основании которой по результатам дедуктивного вывода в соответствии с решающими правилами базы знаний производится выбор соответствующего оборудования КНБК.

#### Список литературы

1. Исмаков Р.А., Хафизов А.Р., Мухаметгалиев И.Д., Гуменников С.Г., Галлямов М.Р. Анализ работы имитационных тренажерных комплексов для обучения практическим навыкам бурения // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 4. С. 9-13.
2. Алимбеков Р.И., Васильев В.И., Нугаев И.Ф., Агзамов З.В. Система автоматизированного управления траекторией движения бурового инструмента // Проблемы машиноведения, конструкционных материалов и технологий: сб. ст. Уфа: УГНТУ, 1997. С. 122-130.

#### References

1. Ismakov R.A., Khafizov A.R., Mukhametgaliev I.D., Gumennikov S.G., Gallyamov M.R. Analiz raboty imitatsionnykh trenazhernykh kompleksov dlya obucheniya prakticheskim navykam bureniya [Operational Analysis of Imitating Training Complexes for Training in Practical Skills of Drilling]. *Neftgazovoe delo - Petroleum Engineering*, 2016, Vol. 14, No. 4, pp. 9-13. [in Russian].
2. Alimbekov R.I., Vasiliev V.I., Nugaev I.F., Agzamov Z.V. Sistema avtomatizirovannogo upravleniya traektoriei dvizheniya burovogo

3. Chernyakhovskaya L.R. Intellectual Decision Support Based on the Ontological Analysis of Corporate Knowledge // Computer Science and Information Technologies (CSIT'2013): The 15th International Workshop. Vienna. 2013, P. 13-17.

4. Cordy L. Cumulative Rock Strength as a Quantitative Means of Evaluating Drill Bit Selection and Emerging PCD Cutter Technology // IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology: Materials of International Conference. Jakarta, Indonesia. 2002. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-77217-MS> (дата обращения: 14.10.2019). DOI: 10.2118/77217-MS.

5. Clegg J.M. Improved Optimization of Bit Selection Using Mathematically Modelled Bit Performance Indices // IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology: Materials of International Conference and Exhibition. Bangkok, Thailand. 2006. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-102287-MS> (дата обращения: 15.10.2019). DOI: 10.2118/102287-MS.

6. Barton S.P. Changing Selection Concepts: True Optimization of Drill Bits with Latest-Generation Rotary-Steerable Systems // SPE Annual Technical Conference and Exhibition: Materials of International Conference. Orleans, Louisiana, USA. 2009. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-124865-MS> (дата обращения: 11.10.2019). DOI: 10.2118/124865-MS.

7. Barton S.P. Bit Selection Using Mathematically Modeled Indices Deliver Significant Improvement in Directional Drilling Performance // Offshore Technology Conference: Materials of International Conference. Houston, Texas, USA. 2009. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-19915-MS> (дата обращения: 11.10.2019). DOI: 10.4043/19915-MS.

8. Jamshidi E., Mostafavi H. Soft Computation Application to Optimize Drilling bit Selection Utilizing Virtual Intelligence and Genetic Algorithms // IPTC 2013: Materials of International Petroleum Technology Conference. Beijing, China. 2013. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/IPTC-16446-MS> (дата обращения: 13.10.2019). DOI: 10.2523/IPTC-16446-MS.

9. Russell S.C. Characterizing Drilling Applications and Bit Designs Using Common Responses Improves Bit Selection Outcomes // IADC/SPE Drilling: Materials of International Conference and Exhibition. Worth, Texas, USA. 2014. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-167917-MS> (дата обращения: 16.10.2019). DOI: 10.2118/167917-MS.

10. Roberts D.V. Tablet-Based Mobile App Software Provides Precise and Instant Bit Selection in the Field // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference: Materials of International Conference. Abu Dhabi, UAE. 2016. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-183424-MS> (дата обращения: 16.10.2019). DOI: 10.2118/183424-MS.

11. Nygaard R. How to Select PDC Bit for Optimal Drilling Performance // Rocky Mountain Oil and Gas Technology Symposium: Materials of International

instrumenta [System of Automated Control of the Trajectory of the Drilling Tool]. *Sbornik statei «Problemy mashinovedeniya, konstruktsionnykh materialov i tekhnologii»* [Collection of Articles «Problems of Mechanical Engineering, Structural Materials and Technologies»]. Ufa, UGNTU Publ., 1997, pp. 122-130. [in Russian].

3. Chernyakhovskaya L.R. Intellectual Decision Support Based on the Ontological Analysis of Corporate Knowledge // The 15th International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2013). Vienna. 2013, P. 13-17.

4. Cordy L. Cumulative Rock Strength as a Quantitative Means of Evaluating Drill Bit Selection and Emerging PCD Cutter Technology. *Materials of International Conference «IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology»*. Jakarta, Indonesia, 2002. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-77217-MS> (accessed 14.10.2019). DOI: 10.2118/77217-MS.

5. Clegg J.M. Improved Optimization of Bit Selection Using Mathematically Modelled Bit Performance Indices. *Materials of International Conference and Exhibition «IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology»*. Bangkok, Thailand, 2006. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-102287-MS> (accessed 15.10.2019). DOI: 10.2118/102287-MS.

6. Barton S.P. Changing Selection Concepts: True Optimization of Drill Bits With Latest-Generation Rotary-Steerable Systems. *Materials of International Conference «SPE Annual Technical Conference and Exhibition»*. Orleans, Louisiana, USA, 2009. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-124865-MS> (accessed 11.10.2019). DOI: 10.2118/124865-MS.

7. Barton S.P. Bit Selection Using Mathematically Modeled Indices Deliver Significant Improvement in Directional Drilling Performance. *Materials of International Conference «Offshore Technology Conference»*. Houston, Texas, USA, 2009. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-19915-MS> (accessed 11.10.2019). DOI: 10.4043/19915-MS.

8. Jamshidi E., Mostafavi H. Soft Computation Application to Optimize Drilling bit Selection Utilizing Virtual Intelligence and Genetic Algorithms. *Materials of International Petroleum Technology Conference «IPTC 2013»*. Beijing, China, 2013. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/IPTC-16446-MS> (accessed 13.10.2019). DOI: 10.2523/IPTC-16446-MS.

9. Russell S.C. Characterizing Drilling Applications and Bit Designs Using Common Responses Improves Bit Selection Outcomes. *Materials of International Conference and Exhibition «IADC/SPE Drilling»*. Worth, Texas, USA, 2014. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-167917-MS> (accessed 16.10.2019). DOI: 10.2118/167917-MS.

10. Roberts D.V. Tablet-Based Mobile App Software Provides Precise and Instant Bit Selection in the Field. *Materials of International Conference «Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and*

Denver, Colorado, USA. 2007. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-107530-MS> (дата обращения: 16.10.2019). DOI: 10.2118/107530-MS.

12. Macini P. Drill-Bit Catalog and Bit Index: a New Method for Bit Performance Evaluation // SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference: Materials of International Conference. Rio de Janeiro, Brazil. 2005. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-94798-MS> (дата обращения: 12.10.2019). DOI: 10.2118/94798-MS.

13. Amorim D.S. BHA Selection and Parameter Definition Using Vibration Prediction Software Leads to Significant Drilling Performance Improvements // SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference: Materials of International Conference. Mexico City, Mexico. 2012. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-152231-MS> (дата обращения: 24.10.2019). DOI: 10.2118/152231-MS.

14. Chen D.C.K. Integrated BHA Modeling Delivers Optimal BHA Design // SPE/IADC Middle East Drilling and Technology Conference: Materials of International Conference. Cairo, Egypt. 2007. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-106935-MS> (дата обращения: 24.10.2019). DOI: 10.2118/106935-MS.

15. Greenaway R. Improving Reliability and Consistency in BHA Configuration Through the Use of an Expert Tool-Selection System // SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention: Materials of International Conference and Exhibition. The Woodlands, Texas, USA. 2007. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-107100-MS> (дата обращения: 19.10.2019). DOI: 10.2118/107100-MS.

16. Bjornsson E. Drilling Optimization Using Bit Selection Expert System and ROP Prediction Algorithm Improves Drilling Performance and Enhances Operational Decision Making by Reducing Performance Uncertainties // SPE Annual Technical Conference and Exhibition: Materials of International Conference. Houston, Texas, USA. 2004. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-90752-MS> (дата обращения: 24.10.2019). DOI: 10.2118/90752-MS.

17. Shi X. Integrated Drilling Database Enables Automated Drilling Engineering Design // SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition: Materials of International Conference. Nusa Dua, Bali, Indonesia. 2015. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-176331-MS> (дата обращения: 14.10.2019). DOI: 10.2118/176331-MS.

18. Protégé. URL: <http://protege.stanford.edu> (дата обращения: 20.10.2019).

19. Ayazyan G.K., Tausheva E.V. Parametric Synthesis of PID Controllers with Constrained // Soft Computing and Measurement (SCM): Materials of XXI International Conference. Saint Petersburg, Russia. 2018. Vol. 1. pp. 356.

20. Agzamov Z.V. Head-Target Tracking Control of Well Drilling // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015. No. 3. pp. 032159.

*Conference*». Abu Dhabi, UAE, 2016. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-183424-MS> (accessed 16.10.2019). DOI: 10.2118/183424-MS.

11. Nygaard R. How to Select PDC Bit for Optimal Drilling Performance. *Materials of International Symposium «Rocky Mountain Oil and Gas Technology Symposium»*. Denver, Colorado, USA, 2007. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-107530-MS> (accessed 16.10.2019). DOI: 10.2118/107530-MS.

12. Macini P. Drill-Bit Catalog and Bit Index: a New Method for Bit Performance Evaluation. *Materials of International Conference «SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference»*. Rio de Janeiro, Brazil, 2005. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-94798-MS> (accessed 12.10.2019). DOI: 10.2118/94798-MS.

13. Amorim D.S. BHA Selection and Parameter Definition Using Vibration Prediction Software Leads to Significant Drilling Performance Improvements. *Materials of International Conference «SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference»*. Mexico City, Mexico, 2012. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-152231-MS> (accessed 24.10.2019). DOI: 10.2118/152231-MS.

14. Chen D.C.K. Integrated BHA Modeling Delivers Optimal BHA Design. *Materials of International Conference «SPE/IADC Middle East Drilling and Technology Conference»*. Cairo, Egypt, 2007. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-106935-MS> (accessed 24.10.2019). DOI: 10.2118/106935-MS.

15. Greenaway R. Improving Reliability and Consistency in BHA Configuration Through the Use of an Expert Tool-Selection System. *Materials of International Conference and Exhibition «SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention»*. The Woodlands, Texas, USA, 2007. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-107100-MS> (accessed 19.10.2019). DOI: 10.2118/107100-MS.

16. Bjornsson E. Drilling Optimization Using Bit Selection Expert System and ROP Prediction Algorithm Improves Drilling Performance and Enhances Operational Decision Making by Reducing Performance Uncertainties. *Materials of International Conference «SPE Annual Technical Conference and Exhibition»*. Houston, Texas, USA, 2004. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-90752-MS> (accessed 24.10.2019). DOI: 10.2118/90752-MS.

17. Shi X. Integrated Drilling Database Enables Automated Drilling Engineering Design. *Materials of International Conference «SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition»*. Nusa Dua, Bali, Indonesia, 2015. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-176331-MS> (accessed 14.10.2019). DOI: 10.2118/176331-MS.

18. Protégé. Available at: <http://protege.stanford.edu> (accessed 20.10.2019).

URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032159/pdf> (дата обращения: 14.10.2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032159.

21. Исмаков Р.А., Рахматуллин Д.В., Мухаметгалиев И.Д. Применение виртуального программы-тренажера для ЭВМ «Слайд Мастер 1.18» для обучения практическим навыкам бурения нефтяных и газовых скважин с использованием забойных телеметрических систем // Электронный научный журнал «Нефтяная провинция». 2015. № 4. С. 122-135.

22. Алимбеков Р.И., Васильев В.И., Нугаев И.Ф., Семеран В.А., Агзамов З.В. Проблема автоматизации управления траекторией ствола наклонно-направленных скважин // Проблемы механики и управления: сб. тр. Уфа: ГП Принт, 1994. С. 153-163.

19. Ayazyan G.K., Tausheva E.V. Parametric Synthesis of PID Controllers with Constrained. *Materials of XXI International Conference «Soft Computing and Measurement (SCM)»*. Saint-Petersburg, Russia, 2018, Vol. 1, pp. 356.

20 . Agzamov Z.V. Head-Target Tracking Control of Well Drilling. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1015, No. 3, pp. 032159. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032159/pdf> (accessed 14.10.2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032159.21.

21. Ismakov R.A., Rakhmatullin D.V., Mukhametgaliev I.D. Primenenie virtual'nogo programmy-trenazhera dlya EVM «Slaid Master 1.18» dlya obucheniya prakticheskim navykam bureniya neftyanykh i gazovykh skvazhin s ispol'zovaniem zaboinykh telemetricheskikh sistem [Using Slide Master 1.18 On-Line Simulator for Hands-On Training in Oil and Gas Well Drilling Using LWD System]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftyanaya provintsiya» - Neftânaâ Provinciâ*, 2015, No. 4. pp. 122-135. [in Russian].

22. Alimbekov R.I., Vasil'ev V.I., Nugaev I.F., Semeran V.A., Agzamov Z.V. Problema avtomatizatsii upravleniya traektoriei stvola naklonno-napravlennykh skvazhin [The Problem of Automation of Control of the Trajectory of the Trunk of Directional Wells]. *Sbornik trudov «Problemy mekhaniki i upravleniya»* [Collection of Works «Problems of Mechanics and Control»]. Ufa, GP Print Publ., 1994, pp. 153-163. [in Russian].

#### Авторы

• Агзамов Фарит Акрамович, д-р техн. наук, профессор  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
Профессор кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин»  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1  
e-mail: faritag@yandex.ru

• Мухаметгалиев Ильмир Дамирович  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
Ассистент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин»  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1  
e-mail: ilmir8787@mail.ru

#### The Authors

• Agzamov Farit A., Doctor of Engineering Sciences, Professor  
Ufa State Petroleum Technological University  
Professor of Oil and Gas Well Drilling Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation  
e-mail: faritag@yandex.ru

• Mukhametgaliev Ilmir D.  
Ufa State Petroleum Technological University  
Assistant of Oil and Gas Well Drilling Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation  
e-mail: ilmir8787@mail.ru