

На правах рукописи



ФЕДИН Дмитрий Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ БУРЕНИЯ  
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ  
ВЫРАБОТОК С ЦЕЛЬЮ ОБОСНОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИХ  
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Специальность 25.00.14 – «Технология и техника геологоразведочных работ»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Томск – 2014



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время существует высокая потребность в бурении геологоразведочных скважин для уточнения местоположения залегания полезных ископаемых существующих месторождений, а также разведки новых.

При геологоразведочном бурении целесообразно применение установок, обеспечивающих бурение скважин малого диаметра (40÷70 мм) с целью снижения затрат на материалы и инструмент, а также способствующих повышению скорости бурения. При проходке скважин в породах средней твердости и выше актуальным является интенсификация вращательного бурения за счет применения машин ударно-вращательного действия.

Вопросы энергетики ударного бурения тесно связаны с проблемами прочности и долговечности бурового инструмента и деталей буровых машин, с вопросами эффективного применения различных типов привода в механизмах машины. В связи с этим проводятся теоретические и экспериментальные исследования процессов передачи ударного импульса по колонне бурильных труб, влияния отраженного импульса на величину напряжений в деталях и узлах машины, эффективности применения того или иного вида энергии в податчиках и других приводах установок.

Эти исследования позволяют ожидать улучшения условий эксплуатации буровых машин, увеличения механической скорости бурения, повышения надежности и долговечности узлов установок. Но одним повышением механической скорости бурения, долговечности инструмента и основных узлов машин нельзя добиться резкого повышения производительности и снижения затрат на бурение скважин.

Поэтому одновременно ведутся исследования по определению влияния вида используемой энергии на эффективность бурения скважин; решаются вопросы, связанные с совершенствованием и прогнозированием параметров буровых машин и их приводов. Решить эти задачи возможно современными методами моделирования с применением прогрессивных компьютерных программ.

На протяжении последних 20 лет анализу зависимости производительности бурения скважин из подземных горных выработок от различных факторов посвящено сравнительно небольшое число работ. В исследованиях Шаумяна Г.А., Б.Ф. Скафы, Д.Н. Маликова, В.И. Дусева, Л.А. Вуккерта, А.П. Саммеля, А.В. Топчиева, В.Е. Солода, Б.М. Радищева, С.Г. Калошина, Ю.Б. Грабова, В.А. Акулова, В.Ф. Щербинина, И.Ф. Медведева авторы единогласно признают значительное влияние на производительность вспомогательных операций (работ), и с различной степенью полноты пытались это отразить. Нескоромных В.В. отмечает, что при оптимизации и повышении производительности бурения отдельное внимание следует уделять разработке «буровых» алгоритмов.

Работа связана с выполнением актуальных научных исследований, выполняемых в рамках проекта «Исследование взаимодействия силовых им-

пульсов в буровом инструменте и массиве горных пород при бурении шпуров и скважин из подземных горных выработок» при поддержке Федеральной целевой программы на 2009–2013 гг. № ГК 2.445С2010 от 03.09.2009 г., в реализации которого автор принимал непосредственное участие.

**Целью работы** является повышение производительности бурения геологоразведочных скважин за счет сокращения затрат времени на вспомогательные операции при бурении скважин, выборе рациональных параметров буровых машин, а также совершенствовании конструкций отдельных приводов буровых машин.

Предметом данного исследования являются операции, выполняемые при бурении геологоразведочных скважин (бурение, замена коронки, рабочий и холостой ход податчика, подключение к пневмо- и электросети, осмотр станка и рабочего места, промывка скважины, свинчивание и навинчивание труб бурильной колонны, закрепление и раскрепление буровой установки в забое, переезд буровой установки на новый веер скважин), их взаимосвязи с параметрами буровых машин (давление сжатого воздуха, длина бурильных труб, рейсовой проходки, мощность двигателя податчика, механизма поворота рамы, механизма передвижения установки, мощность двигателя вращателя, давление рабочей жидкости, производительность насоса маслостанции, производительность насоса вращателя и других механизмов).

Для достижения поставленной цели, а именно для разработки методики расчета и выбора параметров станков, обеспечивающих высокопроизводительное бурение скважин малого диаметра, необходимо **решить следующие задачи:**

- выявить структуру операций, выполняемых при бурении геологоразведочных скважин и представить взаимосвязь затрат времени на выполнение технологических операций в виде аналитических зависимостей от параметров буровых станков;
- разработать технико-экономическую модель процесса бурения скважин ударно-вращательным способом и методику выбора параметров станков;
- определить рациональные области использования различных типов приводов буровых станков;
- привести примеры оптимизации реальных буровых станков и совершенствования их приводов.

Данная работа является частью комплексной работы по исследованию и совершенствованию буровых машин и механизмов для бурения геологоразведочных скважин в породах средней и высокой твердости, проводимой коллективом кафедры теоретической и прикладной механики Института физики высоких технологий, а также кафедры бурения скважин Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

### **Научная новизна.**

1. На основе исследований рабочих процессов бурения геологоразведочных скважин из подземных горных выработок установлены взаимосвя-

зи между рабочими операциями, выполняемыми приводами отдельных механизмов буровых установок.

2. Определена степень влияния изменения продолжительности операций на производительность бурения скважин.

3. Разработана технико-экономическая модель буровых установок, позволяющая оптимизировать их параметры одновременно по нескольким научно обоснованным критериям.

4. Определены области рационального использования станков с различными типами приводов с учетом технико-экономических показателей.

5. В лабораторных условиях доказана работоспособность безбойкового гидроимпульсного механизма, являющегося усовершенствованной моделью гидравлического привода буровых установок.

6. Научно обоснован предложенный автором надежный способ регулирования энергии силовых импульсов гидроимпульсного механизма для интенсификации вращательного способа бурения скважин из подземных горных выработок, новизна которого подтверждена патентом РФ.

#### **Практическая значимость проведенных исследований:**

Практическая ценность выполненной работы заключается в том, что на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации разработаны:

1. Методика исследования буровых установок с различными типами привода (пневматическим, гидравлическим, электрическим, а также их комбинациями) позволяет оценить влияние типа привода на эффективность бурения уже на стадии проектирования установки.

2. Предложенная технико-экономическая модель, учитывая наиболее значимые критерии эффективности буровой установки, позволяет построить многоугольники, ограничивающие рациональные значения параметров буровых установок с различными типами приводов.

3. Использование разработанного устройства регулирования энергии силового импульса гидроимпульсного механизма, новизна и оригинальность которого защищена патентом РФ на полезную модель, позволяет выбрать оптимальную скорость бурения при прохождении слоев горной породы различной твердости.

Научное обоснование применения различных типов приводов для механизмов буровых машин предусматривает использование технико-экономических критериев, которые позволяют измерять, анализировать и оценивать в сопоставимых величинах результаты данных исследований. Разработанные методики расчетов с целью обоснования типа привода отдельных механизмов буровых установок и выбора их рациональных параметров являются инструментом и одним из способов решения технических проблем дальнейшего совершенствования буровых машин.

Предлагаемые в данной работе рекомендации могут быть использованы научно-исследовательскими и проектными организациями при создании новой или совершенствовании существующей техники бурения скважин малого диаметра из подземных горных выработок.

**Методы исследований.** В процессе выполнения работы применялся комплексный подход исследований, который включал в себя анализ и научное обобщение информационных источников по выбранной теме, проведение теоретических и экспериментальных исследований, математическое моделирование основных и вспомогательных процессов бурения геологоразведочных скважин из подземных горных выработок, в том числе с использованием современных программных комплексов Visual Basic, Компас, MathCAD.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Показано, что на основе разработанной методики расчета изменения параметров приводов буровых установок можно существенно повысить производительность бурения за счет сокращения времени, затрачиваемого на выполнение вспомогательных операций при бурении геологоразведочных скважин из подземных горных выработок.

2. Установлено, что изменение параметров приводов буровой машины для повышения ее производительности имеет границы, связанные с конкретными ограничениями (вес машины, мощность, себестоимость, приведенные затраты и др.), что позволяет выбрать тот или иной тип привода с учетом максимального сокращения средней продолжительности операций и достижения минимально возможных затрат, обеспечивая ресурсоэффективность и энергосбережение.

3. Доказано, что применение двух нерегулируемых генераторов в системе гидроимпульсного механизма для бурения геологоразведочных скважин позволяет регулировать энергию силовых импульсов при проходке слоев горной породы с различной твердостью, что благодаря дополнительному воздействию высокочастотных силовых импульсов на разрушаемую горную породу способствует повышению производительности буровых установок.

**Достоверность** и обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций и результатов обеспечивается необходимым объемом теоретических исследований, выполненных на основе математического моделирования и подтверждаются основными положениями теоретической механики, а также сходимостью результатов исследований с данными других авторов.

**Реализация выводов и рекомендаций.**

Разработанная автором технико-экономическая модель рабочих процессов бурения скважин из подземных горных выработок передана в ОАО «Завод бурового оборудования» для совершенствования выпускаемых и разработки новых буровых установок и в ООО «Аверс 1» для совершенствования применяемых буровых установок.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на научных семинарах кафедры теоретической и прикладной механики Национального исследовательского Томского политехнического университета; в докладах на конференциях различного уровня: на VI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения», на XVI – XVIII международных научных симпозиумах имени академика М. А. Усова студентов и

молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», на международных молодежных научных конференциях «Севергеоэкотех-2011, 2012, 2013».

**Личный вклад автора** состоит:

- в проведении аналитических исследования технологических процессов бурения геологоразведочных скважин из подземных горных выработок с помощью буровых установок с различными типами приводов;
- в разработке технико-экономической модели буровой установки и методики выбора ее рациональных параметров;
- в апробировании безбойкового гидроимпульсного механизмом и обработке результатов экспериментальных исследований;
- в разработке технического решения по регулированию энергии импульса гидроимпульсного механизма.

Часть исследований выполнена при непосредственном участии автора совместно с Л.А. Саруевым, А.В. Шадринной, А.А. Казанцевым, А.П. Колодиным, В.Г. Крец.

**Публикации.** По теме работы имеется 14 публикаций, в т. ч. 5 в журналах, рекомендованных ВАК; 1 патент РФ на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертация выполнена на 133 страницах текста. Она состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 101 наименований и содержит 19 рисунков, 7 таблиц и 3 приложения.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель, научная новизна, практическая значимость, основные положения, защищаемые в работе.

В первой главе диссертации приведен краткий обзор способов и средств бурения скважин, обзор буровых установок. Приведен анализ затрат времени на бурение скважин станками с различными типами приводов ударно-вращательного действия. Показано что подготовительно-заключительные и вспомогательные операции занимают значительную часть процесса бурения скважин из подземных горных выработок для всех типов установок.

Во второй главе рассмотрены вопросы, касающиеся исследования состава и структуры вспомогательных операций по типам приводов. Определена взаимосвязь продолжительности вспомогательных операций с параметрами буровых машин и их приводов.

В третьей главе приведена разработанная технико-экономическая модель, позволяющая при заданных начальных условиях определять такие значения переменных параметров типа приводов отдельных механизмов, которые удовлетворяли бы условию максимума производительности при многофакторном анализе эффективности буровых установок с учетом выбранных ограничений.

В четвертой главе представлен принцип работы и экспериментальные исследования гидроимпульсного силового механизма, способствующего интенсификации разрушения горных пород при бурении скважин малого диаметра из подземных выработок.

Структура автореферата сформирована согласно защищаемым положениям.

**Первое научное положение.** Показано, что на основе разработанной методики расчета изменения параметров приводов буровых установок можно существенно повысить производительность бурения за счет сокращения времени, затрачиваемого на выполнение вспомогательных операций при бурении геологоразведочных скважин из подземных горных выработок.

Для удобства анализа влияния продолжительности операций на производительность бурения предложено разделить их на группы: операции, не связанные с работой привода –  $T_{\text{нп}}$  (изменение типа и параметров привода не повлияет на продолжительность времени этих операций) и операции, продолжительность времени которых напрямую зависит от привода –  $T_{\text{зп}}$  (изменение типа привода или его параметров влияет на изменение продолжительности операций).

Установлено, что меньший эффект дает снижение продолжительности операций, не связанных с работой привода  $T_{\text{нп}}$  (кривая 4 для всех типов привода на рис. 1). Из рисунка видно, что в первую очередь целесообразно максимально сокращать операции, связанные с работой привода ( $T_{\text{зп}}$ , кривые 1, 2, 3).

Оценивать рациональность изменения той или иной операции с целью увеличения производительности бурения непосредственно по самой производительности сложно. С этой целью предложено ввести критерий, позволяющий в целом оценить работу механизмов буровой установки – средняя продолжительность операций:

$$\bar{t}_{\text{оп}} = \frac{T_{\text{зп}}}{n} = \frac{\sum^n t_i}{n}, \text{ мин}, \quad (1)$$

где  $t_i$  - продолжительность выполнения  $i$ -ой операции при бурении скважины глубиной  $H$  метров;  $n$  – количество операций, составляющих величину  $T_{\text{зп}}$ .

Для увеличения производительности из (2) видно необходимо, чтобы среднее время выполнения одной операции ( $\bar{t}_{\text{оп}}$ ) уменьшалось

$$Q = \frac{H}{T_{\text{нп}} + \bar{t}_{\text{оп}} \cdot n}. \quad (2)$$

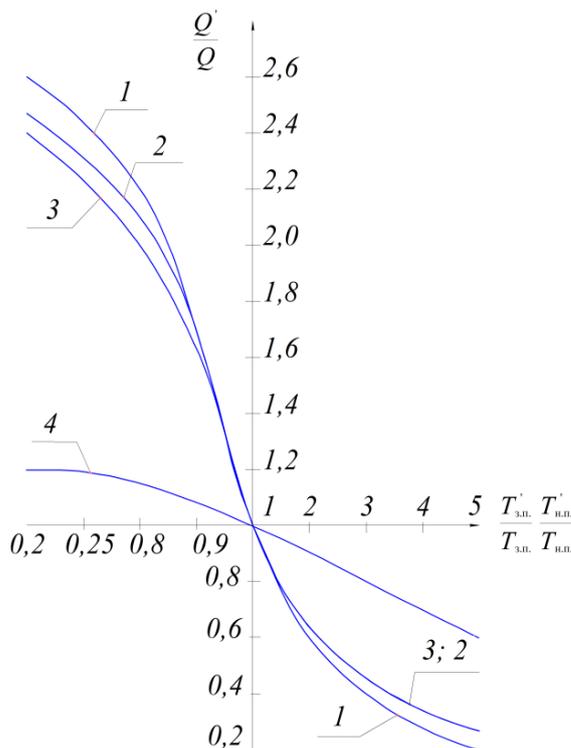


Рис. 1. Зависимость изменения относительной производительности бурения от времени вспомогательных операций:

*операции, зависящие от типа привода:*

1 -  $T_{зп}$  гидропривода;

2 -  $T_{зп}$  пневмопривода;

3 -  $T_{зп}$  пневмогидро- и электропривода;

*операции, не зависящие от типа привода:*

4 -  $T_{нп}$ .

Оставляя  $T_{нп}$  неизменными по величине, необходимо обеспечить условие  $\bar{t}_{оп} \rightarrow 0$ .

Достигнуть этого можно следующими способами:

1) уменьшить суммарную продолжительность операций, путем сокращения времени операций, ее составляющих:

$$T_{зп} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad n = \text{const};$$

2) сократить количество наиболее продолжительных операций:  $n \rightarrow 1$  при постоянных величинах остающихся операций (пределом снижения служит одна операция - бурение);

3) уменьшать продолжительность отдельных операций с одновременным сокращением числа других операций:

$$T_{зп} \rightarrow 0 \quad \text{и} \quad n \rightarrow 1$$

Таким образом, поставленная задача может быть решена в соответствии с разработанной методикой, которая включает в себя следующие этапы:

1. Группировку вспомогательных технологических операций и определение их длительности через параметры бурильной установки и приводов ее механизмов.

2. Выбор параметров, изменение которых максимально снижает среднюю продолжительность операций.

3. Многошаговый поиск решения с учетом принятых ограничений и показателей эффективности:

3.1. Распределить весь цикл бурения с использованием рассматриваемой буровой установки в виде двух групп операций (зависящие и не зависящие от типа привода -  $T_{зп}$ ;  $T_{нп}$ ):

$$T_{н.п.} = \sum_{i=1}^n t_i, \quad T_{з.п.} = \sum_{i=1}^n t_i.$$

3.2. Найти их разность  $\Delta T = T_{з.п.} - T_{н.п.}$ .

3.3. Определить математическую зависимость операций, входящих в  $T_{з.п.}$  от параметров установки и приводов ее механизмов:

$$t_i = f(a_i, b_i, \dots K_i),$$

$$t_j = f(a_j, b_j, \dots K_j),$$

$$\dots \dots \dots$$

$$t_m = f(a_m, b_m, \dots K_m),$$

где  $a, b, \dots K$  – параметры установки.

3.4. Установить предельные значения параметров:

$$a_{i \max} \geq a_i \geq a_{i \min},$$

$$b_{i \max} \geq b_i \geq b_{i \min},$$

$$\dots \dots \dots$$

$$K_{i \max} \geq K_i \geq K_{i \min}.$$

3.5. Выбрать интервалы изменения параметров:  $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta K$ . Тогда исследуемые параметры могут принимать следующие величины:

$$a_1 = a_0 + \Delta a, a_2 = a_1 + \Delta a, \dots, a_m = a_{m-1} + \Delta a;$$

$$b_1 = b_0 + \Delta b, b_2 = b_1 + \Delta b, \dots, b_m = b_{m-1} + \Delta b;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$K_1 = K_0 + \Delta K, K_2 = K_1 + \Delta K, \dots, K_m = K_{m-1} + \Delta K.$$

3.6. Определить среднюю продолжительность операции при начальных значениях параметров:

$$t_{оп.} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}.$$

3.7. При исходных значениях параметров найти удельные приведенные затраты  $Z_{пр.0}$ , себестоимость 1 пог. м скважины  $C_0$ , относительный вес  $G_{y.0}$  и удельную мощность  $N_{y.0}$ :

$$Z_{пр.0} = f(a, b, \dots K),$$

$$C_0 = f(a, b, \dots K),$$

$$G_{y.0} = f(a, b, \dots K),$$

$$N_{y.0} = f(a, b, \dots K).$$

3.8. Определить среднюю продолжительность операций при изменении каждого параметра на определенный интервал:

$$t_{оп.}^{a_1}, \text{ при } a_0 \rightarrow a_1, (b_0, c_0, \dots, K_0) = \text{const};$$

$$t_{оп.}^{b_1}, \text{ при } b_0 \rightarrow b_1, (a_0, c_0, \dots, K_{i-1}) = \text{const};$$

$$\dots \dots \dots$$

$$t_{оп.}^{K_1}, \text{ при } K_0 \rightarrow K_1, (a_0, b_0, c_0, \dots, K_{i-1}) = \text{const}.$$

3.9. Найти разности между средней продолжительностью операции  $t_{оп.}$  и величинами, полученными в 3.8:

$$\Delta t_{\text{оп.}}^{a_1} = t_{\text{оп.}} - t_{\text{оп.}}^{a_1},$$

$$\Delta t_{\text{оп.}}^{b_1} = t_{\text{оп.}} - t_{\text{оп.}}^{b_1},$$

.....

$$\Delta t_{\text{оп.}}^{K_1} = t_{\text{оп.}} - t_{\text{оп.}}^{K_1}.$$

3.10. Из величин, полученных в 3.9, выбрать максимальную. Параметр (например,  $a_1$ ), давший  $\Delta t_{\text{оп.}}^{a_1} = \max$ , обеспечивает наибольшее приращение производительности. Остается проверить его по ограничениям, найденным в 3.7. Для этого:

3.10.1. В случае  $n \cdot \Delta t_{\text{оп.}}^{a_1} < \Delta T$  найти удельные приведенные затраты  $Z_{\text{пр.}}^{a_1}$  и себестоимость  $C^{a_1}$  при принятом значении данного параметра.

3.10.2. При  $n \cdot \Delta t_{\text{оп.}}^{a_1} > \Delta T$  расчеты, связанные с оптимизацией и сокращением времени операций группы  $T_{\text{з.п.}}$ , закончить (следует понимать так: изменение параметра  $a_0$  до величины  $a_1$  обеспечило прирост производительности в заданной области  $\Delta T$ ). Поэтому следует перейти к сокращению операций группы  $T_{\text{н.п.}}$ .

3.11. Сравнить  $Z_{\text{пр.}}^{a_1}$  и  $C^{a_1}$  со значениями  $Z_{\text{пр.0}}$  и  $C_0$ , найденными в 3.7, если выполняется 3.10.1. При  $Z_{\text{пр.}}^{a_1} < Z_{\text{пр.0}}$  и  $C^{a_1} < C_0$  изменить параметр  $a_1$  еще на интервал  $\Delta a$  и при новом значении параметра  $a_2 = a_1 + \Delta a$  найти среднюю продолжительность операции,  $t_{\text{оп.}}^{a_2}$ .

3.12. Определить разность между средней продолжительностью операции (б) и вновь полученной при 3.11:  $\Delta t_{\text{оп.}}^{a_1} = t_{\text{оп.}} - t_{\text{оп.}}^{a_2}$ .

3.13. Если величина  $\Delta t_{\text{оп.}}^{a_2}$  опять наибольшая, то параметр  $a_2$  изменить еще на интервал  $a_3 = a_2 + \Delta a$  и далее следовать с 3.10. Если величина  $\Delta t_{\text{оп.}}^{a_2}$  не является максимальной, то выбрать в 3.9 другой параметр, обеспечивший наибольшую из имеющихся величин  $\Delta t_{\text{оп.}}^i$  и все операции с ним производить с 3.10.

Если при выбранном параметре в 3.11 окажется, что удельные приведенные затраты или себестоимость 1 пог. м скважины, найденные с этим параметром, будут больше  $Z_{\text{пр.0}}$  и  $C_0$ , то от изменения этого параметра пока следует отказаться и выбрать другой согласно 10.

Согласно данного алгоритма исследуемые параметры изменять до тех пор, пока не будет выполнено условие:

$$n \sum_{i=1}^m \Delta t_{\text{оп.}}^i \geq \Delta T,$$

или параметры не превысят свои предельные значения.

При  $n \sum_{i=1}^m \Delta t_{\text{оп.}}^i \geq \Delta T$  перейти к группе операций  $T_{\text{н.п.}}$  и далее следовать с 3.3, попеременно сокращая продолжительность или количество операций групп  $T_{\text{н.п.}}$  и  $T_{\text{з.п.}}$  за счет совершенствования бурильной установки.

Опираясь на возможности разработанной технико-экономической модели, был проведен поиск рациональных параметров установки с пневмогидроприводом, результаты которого приведены в табл. 1.

Табл. 1. Оптимальные значения величин параметров установки с пневмогидроприводом

Параметры	Исходное значение параметра	Оптимальные значения параметров
Давление сжатого воздуха, Р, атм	5,0	<b>9,0</b>
Длина бурильной трубы, $l_{\text{б.т.}}$ , м	1,0	<b>1,3</b>
Длина рейсовой проходки, $l_{\text{р.}}$ , м	4,0	<b>6,0</b>
Мощность двигателя податчика, $N_{\text{п.}}$ , кВт	1,4	<b>1,62</b>
Мощность двигателя механизма поворота рамы, $N_{\text{пр.}}$ , кВт	1,02	1,02
Мощность двигателя механизма передвижения установки, $N_{\text{пер.}}$ , кВт	5,9	5,9
Производительность насоса маслостанции, $Q_{\text{н.}}$ , л/мин	9,0	9,0

Оптимизация параметров данной буровой установки и ее приводов согласно предложенной технико-экономической модели позволяет повысить производительность бурения на 55% при неизменных значениях удельных приведенных затрат и себестоимости метра скважин за счет увеличения давления сжатого воздуха до 9 атм, длин бурильных труб и рейсовой проходки до 1,3 и 6 м соответственно и мощности двигателя податчика до 1,6 кВт.

**Второе научное положение.** Установлено, что изменение параметров приводов буровой машины для повышения ее производительности имеет границы, связанные с конкретными ограничениями (вес машины, мощность, себестоимость, приведенные затраты и др.), что позволяет выбрать тот или иной тип привода с учетом максимального сокращения средней продолжительности операции и достижения минимально возможных затрат, обеспечивая ресурсоэффективность и энергосбережение.

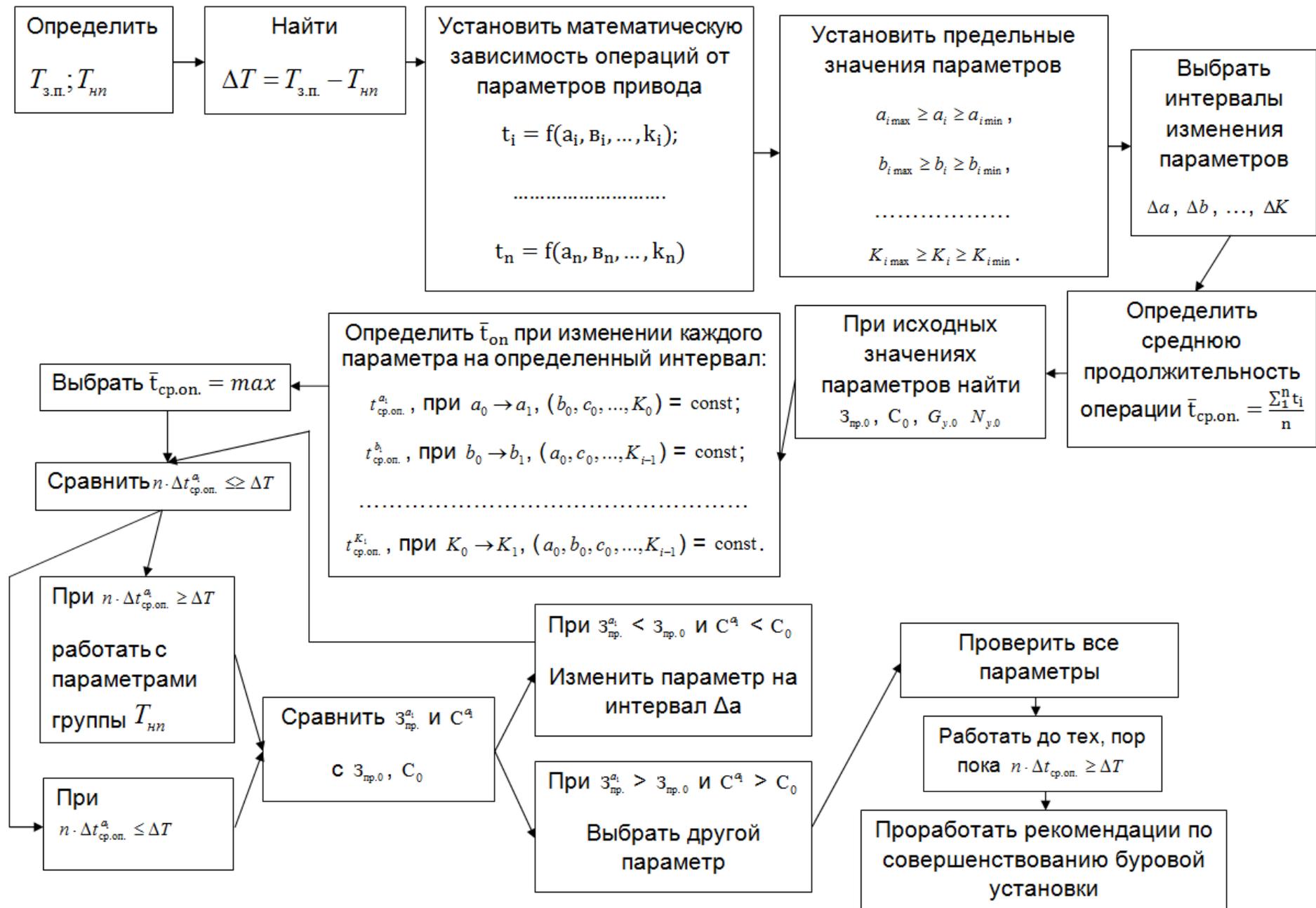


Рис. 2. Блок-схема оптимизации параметров приводов буровых установок по нескольким критериям

Решение задачи об эффективности буровой установки с определенным типом привода на конкретном участке производства предполагает определение экономических границ и области его целесообразного применения. При определенных условиях работы (годовой объем производства, использование календарного времени) рациональнее использовать тот или иной тип привода с учетом себестоимости 1 п.м. скважины (С) (рис. 3 а, б).

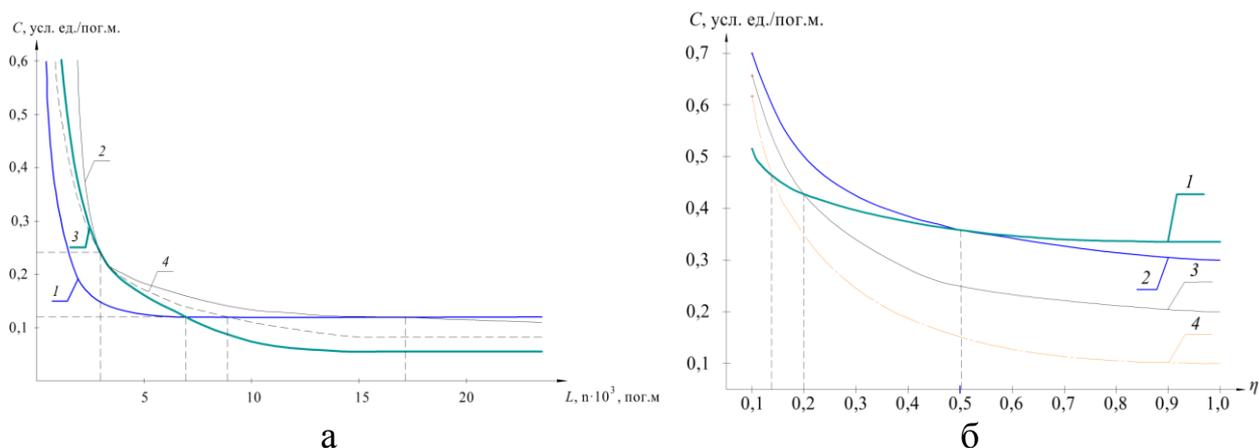


Рис. 3. а) зависимость себестоимости п.м. скважины от годового объема производства работ; б) влияние коэффициента использования календарного времени  $\eta$  на себестоимость п.м. скважины:

- 1) пневмопривод; 2) пневмогидропривод; 3) электропневмогидропривод
- 4) гидропривод

При годовой производительности до 9 тыс. п.м. в год целесообразно использовать электропневмогидроприводные буровые установки, свыше – установки с гидроприводом (рис. 3, а). В условиях загрузки по календарному времени до 0,15 – наиболее эффективно применение пневмоприводных машин, при большей загрузке – гидроприводные. Также можно оценить рациональность применения других типов приводов.

На первый план часто выступают и другие критерии, наиболее полно отражающие конкретное проявление условий эксплуатации. Объективный и всесторонний анализ может быть обеспечен только при условии использования для этих целей системы технико-экономических показателей (себестоимость п.м скважин, удельные приведенные затраты, стоимость энергии, производительность бурения, удельные мощность привода и вес установки).

На рис. 4 представлен график, отражающий результаты исследования мощности двигателя механизма податчика ( $N_p$ ) от выбранных технико-экономических показателей.

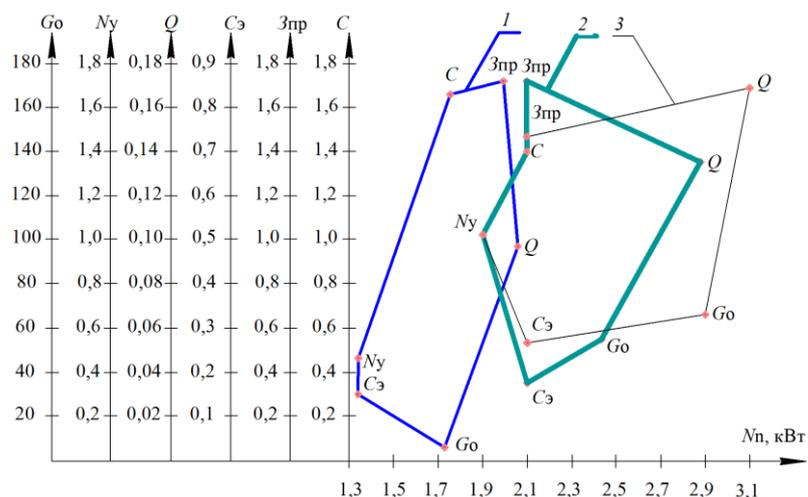


Рис. 4. Границы оптимальной мощности двигателя подающего механизма ( $N_{п.}$ ) для различных типов приводов буровой установки: 1) пневмопривод; 2) пневмогидропривод; 3) электропневмогидропривод

Задаваясь определенным значением параметра ( $N_{п.}$ ), можно определить, какой тип привода обеспечит наиболее эффективное его использование по тому критерию, который интересует. Мощность податчика в пределах от 1,3 до 1,9 кВт эффективно применять только в пневмоприводе. Причём мощность в 1,3 кВт эффективна с точки зрения обеспечения минимальных значений удельной мощности ( $N_{y.1}$ ) стоимости энергии ( $C_{э.1}$ ), а величина ее в 1,9 кВт позволяет получить близкое к минимуму значение приведенных затрат ( $З_{пр.1}$ ) и максимум производительности ( $Q_1$ ).

Более высокие мощности оптимальны для других типов приводов, в частности, от 1,9 до 3,0 кВт рационально применять как в пневмогидроприводе, так и в электропневмогидроприводе.

В том случае, когда требуется произвести оценку привода по всем критериям одновременно, не отдавая предпочтения ни одному из них, оптимальное значение рассматриваемого параметра определится как центр тяжести данного многоугольника.

При наложении многоугольников нескольких критериев ( $N$ ,  $P_{сж.в.}$  и др.) предоставляется возможным определить общую область рациональных значений параметров буровой установки для различных типов приводов, тем самым принять оптимальное решение выбора типа привода по нескольким критериям.

**Третье научное положение.** Доказано, что применение двух нерегулируемых генераторов в системе гидроимпульсного механизма для бурения геологоразведочных скважин позволяет регулировать энергию силовых импульсов при проходке слоев горной породы с различной твердостью, что благодаря дополнительному воздействию высокочастотных силовых импульсов на разрушаемую горную породу способствует повышению производительности буровых установок.

На рис. 5 представлен принцип работы гидроимпульсного силовой механизм, способствующего интенсификации разрушения горных пород при бурении скважин малого диаметра из подземных выработок.

В данном устройстве для формирования силовых импульсов можно выделить два колебательных контура. Первый колебательный контур: гидропульсаторы – 3, 6, создающие колебания давления жидкости; второй: жидкость, находящаяся в замкнутом объеме – 8 с рукавом высокого давления (РВД) – 7, активная масса – 11 с корпусом гидроцилиндра – пневмоподатчик – 10.

Потенциальная энергия сжатого воздуха в пневмоподатчике, разгоняя активную массу, переходит в ее кинетическую энергию. Активная масса, действуя на замкнутый объем жидкости, преобразует свою кинетическую энергию в потенциальную энергию деформированного рукава высокого давления – 7. Деформация рукава высокого давления будет продолжаться до тех пор, пока не израсходуется вся кинетическая энергия массы. Вынужденные колебания данной системы обеспечиваются работой гидропульсатора.

Импульсы давления жидкости формируются следующим образом. При работе гидропульсатора плунжер периодически выталкивает жидкость в замкнутый объем, создавая дополнительное давление в гидроцилиндре и рукаве высокого давления (рис. 5). Благодаря наличию РВД, обладающего нелинейной характеристикой изменения давления ( $p$ ) от относительного изменения объема ( $V$ ), во втором колебательном контуре синусоидальными колебаниями плунжера создаются импульсы давления жидкости, которые воздействуют на поршень и торец гидроцилиндра. Из-за малой упругости пневморужины по сравнению с жидкостью происходит раскачка гидроцилиндра с активной массой. При движении массы на забой и наличии режима работы системы, близкого к резонансному, создаются импульсы давления жидкости, которые через поршень и хвостовик передаются по бурильной колонне в виде волн деформации сжатия на забой скважины.

Применение разработанного безбойкового гидроимпульсного механизма в современных буровых установках характеризуется рядом преимуществ:

- высокий к.п.д. машины за счет отсутствия возвратно-поступательного действия бойка и перетекания жидкости в системе (система замкнута);
- отсутствие бойка, а соответственно и отсутствие шума, вызываемого при ударах о хвостовик буровой колонны при вращательно-ударном способе бурения;
- искробезопасность применяемого механизма.

При бурении слоев породы различной твердости возникают сложности в выборе режима бурения. При проходке слоев горной породы высокой твердости требуется увеличение интенсивности бурения, при бурении породы низкой твердости – уменьшение. В связи с этим возникает необходимость в регулировании силового воздействия на горную породу в процессе бурения. С этой целью было разработано устройство для регулирования энергии силовых импульсов, формируемых гидроимпульсным механизмом.

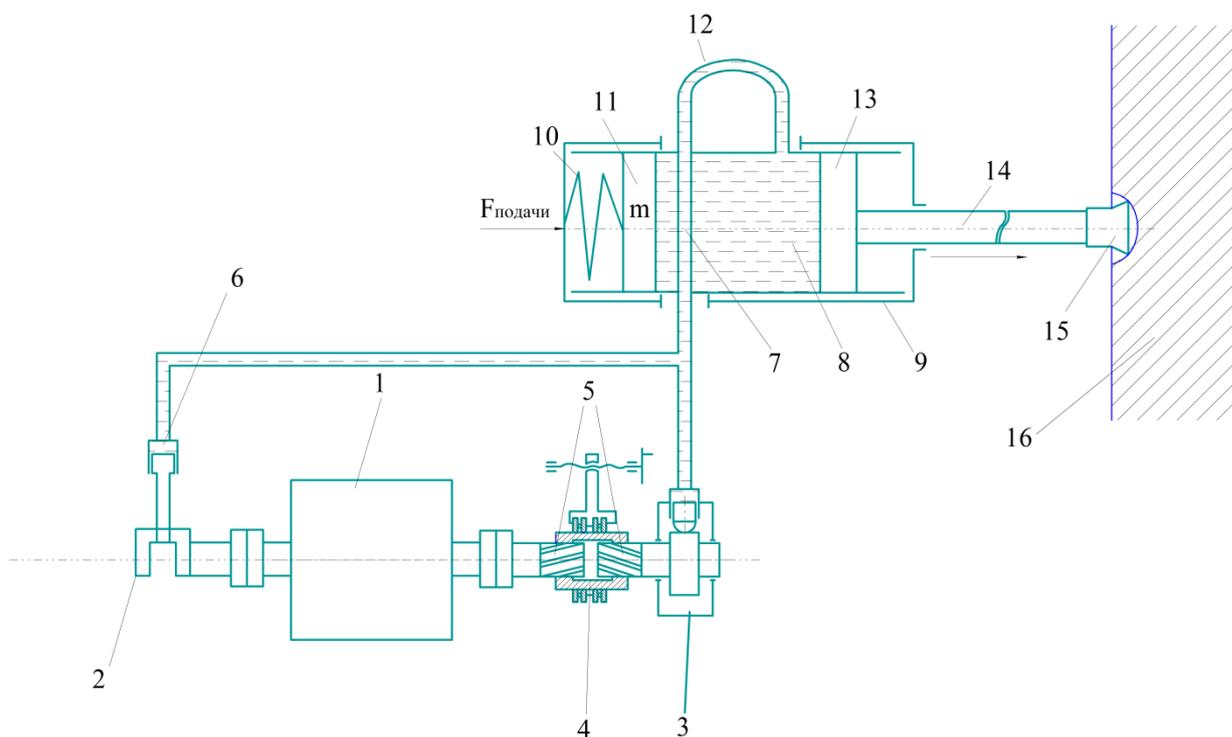


Рис. 5 – Модель гидроимпульсного силового механизма, оснащенного устройством регулирования энергии силовых импульсов

1 – электродвигатель; 2 - кривошипно-шатунный механизм гидропульсатора; 3, 6 – гидропульсаторы (генераторы импульсов); 4 - шлицевая муфта; 5 – валы гидропульсаторов; 7 - рукав высокого давления (РВД); 8 – замкнутый объем жидкости; 9 - корпус гидроцилиндра; 10 – пневмоподатчик; 11 - активная масса; 12 – патрубок; 13 – поршень силового гидроцилиндра; 14 - хвостовик колонны бурильных труб; 15 - породоразрушающий инструмент; 16 - горная порода

Устройство для регулирования энергии импульса гидроимпульсного механизма бурового станка представлено в виде генератора формирования импульсов давления в замкнутой полости, состоящего из нерегулируемых генераторов 3, 6. Генератор 3 выполнен в виде кулачкового механизма, генератор 6 представлен в виде плунжера и соединен с электродвигателем 1 кривошипно-шатунным механизмом 2. Концы валов 5 нерегулируемых генераторов имеют винтовые шлицы противоположного наклона и шлицевую муфту 4.

Регулирование происходит за счет изменения объема жидкости. Как следует из кинематики между перемещением плунжеров генераторов 3, 6 и угловой скоростью  $\omega$  вала приводного двигателя существует соотношение:

$$A=A_1 \cdot \sin \omega t, A=A_2 \cdot \sin \omega t,$$

где  $A$  – текущая координата плунжера,  $\omega$  – угловая скорость вала приводного двигателя,  $t$  – время,  $A_{1,2}$  – амплитудное значение хода плунжера.

Тогда объем пульсирующего потока или просто пульсирующий поток, развиваемый первым и вторым генераторами, соответственно равен:

$$Q_1 = A_1 \cdot f_1 \cdot \sin \omega t, \quad Q_2 = A_2 \cdot f_2 \cdot \sin \omega t,$$

где  $f_{1,2}$  – площадь рабочего торца плунжера.

Поскольку генераторы колебаний 3 и 6 гидравлически между собой связаны и через муфту 4 имеют жесткую регулируемую кинематическую связь, то, когда плунжеры перемещаются синфазно, т.е. когда одновременно проходят верхнюю и нижнюю «мертвые точки» суммарный пульсирующий поток, развиваемый генераторами, равен сумме

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad Q = A_1 \cdot f_1 \cdot \sin \omega t + A_2 \cdot f_2 \cdot \sin \omega t,$$

если

$$A_1 \cdot f_1 = A_2 \cdot f_2, \text{ то}$$

$$Q = 2A_1 \cdot f_1 \cdot \sin \omega t. \tag{4}$$

Если между перемещениями плунжеров генераторов колебаний 3 и 6 нарушена синфазность, т.е. верхние и нижние «мертвые точки» они проходят неодновременно, то это рассогласование характеризуется углом сдвига фаз  $\psi$  и является углом относительного поворота валов генераторов колебаний 3 и 6.

Так как генераторы колебаний 3 и 6 имеют общий приводной двигатель 1, вращающий их с угловой скоростью  $\omega$ , а валы 5 генераторов рассогласованы на угол  $\psi$  муфтой 4, то суммарный пульсирующий поток определится теперь как геометрическая сумма  $\bar{Q} = \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2$  или как сумма сдвинутых на угол  $\psi$  синусоид одинаковой частоты

$$Q = A_1 \cdot f_1 \cdot \sin \omega t + A_2 \cdot f_2 \cdot \sin(\omega t + \psi). \tag{5}$$

Отсюда видно, что если  $\psi = 0$ , то в результате получаем формулу (4), если  $\psi = 180^\circ$ , то

$$Q = A_1 \cdot f_1 \cdot \sin \omega t + (-A_2 \cdot f_2 \cdot \sin \omega t)$$

и при условии

$A_1 \cdot f_1 = A_2 \cdot f_2$  будем иметь  $Q = 0$  (при одинаковом объеме жидкости, вытесняемой в замкнутую полость плунжерами нерегулируемых генераторов).

Формула (5) отражает случай, когда за один оборот вала генератора силовых гидравлических импульсов плунжеры совершают один двойной ход. Если конструктивное выполнение генераторов колебаний таково, что плунжеры совершают  $n$  двойных ходов за один оборот вала (например для кулачковых генераторов колебаний  $n$  – число заходов кулачка), то формула для определения пульсирующего потока принимает вид:

$$Q = A_1 \cdot f_1 \cdot \sin \omega t + A_2 \cdot f_2 \cdot \sin(n\omega t + n\psi). \tag{6}$$

Таким образом, изменяя относительный угол сдвига фаз между валами генераторов колебаний 3 и 6 от 0 до  $\frac{180^\circ}{n}$ , пульсирующий поток изменяется от максимума до нуля.

Регулирование угла сдвига фаз  $\psi$  осуществляется осевым перемещением муфты 4 по винтовым шлицам валов генераторов колебаний.

Рациональным выбором угла наклона шлицев определяется необходимая величина осевого перемещения муфты 4 для изменения пульсирующего потока от нуля до максимума.

Изменение объема пульсирующей жидкости способствует изменению амплитуды формируемого импульса давления в замкнутой полости, а соответственно и энергии силового импульса в бурильной колонне. Увеличение объема пульсирующего потока при неизменных параметрах рукава высокого давления (полый упругий элемент 7, (рис. 5)) приводит к увеличению интенсивности бурения, при уменьшении наоборот – импульсное силовое воздействие на горную породу снижается.

В условиях сложного геологического строения исследуемого контура залегания горной породы оператор может регулировать интенсивность бурения, опираясь на возможности разработанного устройства, то есть подбирать оптимальную величину механической скорости бурения.

Устройство регулирования энергии импульса гидроимпульсного механизма позволяет производить регулирование в пределах от 0 до  $2Q$  (где  $Q$  – объем жидкости вытесняемой в замкнутую полость генератором колебаний) при условии равенства объемов используемых генераторов колебаний.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе, на основании экспериментальных и теоретических исследований, анализа современных технологий и техники представлено решение научно-технической задачи по повышению производительности буровых машин благодаря разработанной на научной основе технико-экономической модели рабочих процессов бурения геологоразведочных скважин из подземных горных выработок.

1. Установлено, что повышение производительности бурения скважин из подземных горных выработок возможно достичь не только за счет увеличения мощности буровой установки и скорости бурения, но также за счет сокращения времени на выполнение вспомогательных операций.

2. Установлены взаимосвязи между операциями, выполняемыми приводами отдельных механизмов буровых установок, выявлена степень влияния их на производительность бурения скважин из подземных горных выработок.

3. Разработана технико-экономическая модель буровых установок, которая позволяет оптимизировать их параметры одновременно по нескольким научно обоснованным критериям.

4. Обосновано утверждение о том, что наиболее существенное влияние на производительность бурения оказывают операции, продолжительность которых зависит от параметров и типа привода буровой установки.

5. Доказано, что увеличение или уменьшение в несколько раз какого-либо одного параметра привода буровой установки не приводит к значи-

тельному увеличению производительности. Существенного увеличения производительности буровых агрегатов можно добиться только путем одновременного изменения ряда наиболее существенных факторов.

6. Определены рациональные границы и области применения буровых установок с различными типами приводов, обеспечивающие ресурсосберегающую и ресурсоэффективную технологию бурения для того или иного типа привода относительно принятых критериев.

7. Разработано устройство регулирования энергии силовых импульсов, формируемых гидроимпульсным механизмом, позволяющее выбрать оптимальный режим бурения при проходке горных пород различной твердости.

### **Опубликованные работы по тематике диссертационного исследования.**

#### **Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК:**

1. Федин Д.В. Разработка технико-экономической модели рабочих процессов бурения скважин из подземных горных выработок / Д.В. Федин, Л.А. Саруев // Горное оборудование и электромеханика. Изд-во «Новые технологии». М., - 2013. – 3. С. – 38-43.

2. Федин Д.В. Оценка эффективности применения различных типов приводов станков для бурения подземных геологоразведочных скважин / Д.В. Федин, А.В. Шадрина // Известия вузов. Геология и разведка. М., - 2013. - 3. С. 57-61.

3. Федин Д.В. Экспериментальные исследования механизма формирования гидравлических импульсов для разрушения горных пород при бурении / Д.В. Федин, А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Известия Томского политехнического университета. г. Томск, – 2012. – Т.321.-№1. С. – 175-179.

4. Федин Д.В. Устройство для регулирования энергии импульса гидроимпульсного механизма / Д.В. Федин, Л.А. Саруев // Известия Томского политехнического университета. г. Томск, – 2012. – Т.323.-№1. С. – 183-186.

5. Федин Д.В. Оценка эффективности передачи силовых импульсов на разрушаемый гранит при вращательно-ударном способе бурения скважин малого диаметра / Д.В. Федин, А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Известия Томского политехнического университета. г. Томск, – 2012. – Т.323.-№1. С. – 179-183.

#### **Патент РФ на полезную модель:**

6. Пат. 124298 Российская Федерация Устройство для регулирования энергии импульса гидроимпульсного механизма бурового станка / Д.В. Федин, А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Бюл. № 2. – 2013.

#### **Публикации в сборниках трудов симпозиумов и конференций:**

7. Федин Д.В. Результаты экспериментальных исследований механизма формирования гидравлических импульсов / Д.В. Федин, А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Современные проблемы машиностроения: труды VI Меж-

дународной научно-технической конференции, г. Томск, 2011, С. 148-153.

8. Федин Д.В. Разработка гидроимпульсного механизма для интенсификации процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном способе бурения // XVI международный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, 2012, С. 376-378.

9. Федин Д.В. Development of Hydroimpulsive Mechanism for Rock Failure in Rotary Percussion Drilling // XVI международный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, 2012, С. 802-803.

10. Федин Д.В. Разработка гидроимпульсного механизма для интенсификации процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном способе бурения / Д.В. Федин, А.В. Шадрин // Материалы XIII юбилейной международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех-2012», г. Ухта, 2012. С 58-62.

11. Федин Д.В. Исследования механизма формирования гидравлических импульсов для интенсификации разрушения горных пород / Д.В. Федин, И.В. Кузнецов // XVII международный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, 2013. С 347-349.

12. Федин Д.В. Разработка технико-экономической модели рабочих процессов бурения скважин из подземных горных выработок // XVII международный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, 2013. С 349-353.

13. Федин Д.В. Техничко-экономическая модель рабочих процессов бурения скважин из подземных горных выработок / Д.В. Федин, А.В. Шадрин // Материалы XIV международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех-2013», г. Ухта, 2013. С 207-211.

14. Федин Д.В. Способ регулирования энергии импульса гидроимпульсного механизма станка при геолого-разведочном бурении скважин из подземных горных выработок // XVIII международный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, 2014. С 476-479.