

УДК 681.5:622.243.2

Л.М. Левинсон<sup>1</sup>; Р.А. Хасанов<sup>1</sup>, e-mail: [superneftegaz@gmail.com](mailto:superneftegaz@gmail.com)

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (Уфа, Россия).

## Оптимизация процесса бурения по данным телеметрических и роторных управляемых систем в режиме реального времени

В статье представлены результаты экспериментальных промысловых и аналитических исследований, позволяющие определить пути решения проблемы оптимизации процесса бурения по данным телеметрических и роторных управляемых систем в режиме реального времени. Представлены основные направления оптимизации бурения, проанализированы особенности применения специализированного программного обеспечения, такого как ROP Optimizer и Shogun, алгоритм и результаты оптимизации режима бурения, спуско-подъемных операций, очистки ствола скважины. На основании проведенного исследования разработана матрица оптимизации, позволяющая избежать многократного внесения исходных данных, повторного проведения расчетов, оценки результатов и т. д. Для начала предложено программное обеспечение объединить в четыре основных модуля: для проектирования бурения, сопровождения режима бурения, геологического моделирования и сопровождения, приема и обработки данных наземных и скважинных датчиков. Далее четыре модуля предлагается объединить в два основных – «Бурение» и «Измерения», а затем – в единую программу «Бурение», позволяющую спланировать и сопровождать бурение скважины от начала и до конца.

Отмечена перспективность разработки интегрированного программного обеспечения вокруг одного программного ядра с учетом наработок наиболее широко применяемых программных продуктов.

В статье также предложена схема анализа режимных параметров бурения, представленная в табличном формате, позволяющая по сочетанию таких параметров, как механическая скорость, детальный механический каротаж, нагрузка на долото, вес на крюке, глубина по стволу, глубина долота, положение блока, крутящий момент на поверхности, количество оборотов в минуту, плотность раствора на входе и на выходе, расход на входе, расход на выходе, давление на стояке, перепад давления, объем в емкостях, газ, прогнозировать поведение буровой колонны и планировать мероприятия, направленные на совершенствование процесса.

Ключевые слова: оптимизация бурения, телеметрические и роторные управляемые системы, алгоритм оптимизации, матрица оптимизации, анализ режимных параметров бурения.

.....

L.M. Levinson<sup>1</sup>; R.A. Khasanov<sup>1</sup>, e-mail: [superneftegaz@gmail.com](mailto:superneftegaz@gmail.com)

<sup>1</sup> State Federal-Funded Educational Institution of Higher Professional Training "Ufa State Petroleum Technological University" (Ufa, Russia).

## Drilling Optimization on Realtime Data from Measuring While Drilling and Rotary Steerable Systems

The article presents the results of experimental field and analytical studies, allowing to determine ways to solve the problem of optimizing the drilling process according to real-time telemetric and rotary controlled systems. The main directions of drilling optimization are presented, the features of the use of specialized software, such as ROP Optimizer and Shogun, the algorithm and results of optimization of the drilling mode, tripping operations, and wellbore cleaning are analyzed. Based on the study, an optimization matrix has been developed to avoid multiple input data, repeated calculations, evaluation of results, etc. For starters, it is proposed to combine the software into four main modules: for drilling design, drilling mode maintenance, geological modeling and tracking, receiving and processing data from surface and downhole sensors. Further, it is proposed to combine the four modules into two main ones – Drilling and Measurements, and then – into a single program Drilling, which allows you to plan and accompany the drilling of the well from start to finish.

The prospects of developing integrated software around one software core taking into account developments of the most widely used software products is noted.

The article also proposes a scheme for analyzing drilling performance parameters, presented in a tabular format, which allows for a combination of parameters such as mechanical speed, detailed mechanical logging, bit load, hook weight, barrel depth, bit depth, block position, and torque surface, the number of rotation per minute, the density of the solution at the inlet and at the outlet, the inlet flow rate, the outlet flow rate, riser pressure, differential pressure, tank volume, gas, predict the behavior of the drill string and plans five measures aimed at improving the process.

**Keywords:** drilling optimization, telemetric and rotary steerable systems, optimization algorithm, optimization matrix, analysis of operational parameters of drilling.

Важным элементом совершенствования технологии бурения в современных условиях является оптимизация бурения по данным телеметрических и роторных управляемых систем, в т. ч. оптимизация [1]:

- механической скорости бурения;
- проводки ствола скважины по заданной траектории;
- спуско-подъемных операций;
- распределения давления по стволу скважины при бурении и промежуточных операциях;
- очистки ствола скважины от выбуренной породы;
- в целях предотвращения осложнений и аварий, то есть своевременное обнаружение промывов инструмента, газонефтеводопроявления, прихвата-образования для принятия соответствующих мер.

Наиболее перспективным из перечисленных направлений является оптимизация механической скорости бурения по данным телеметрической системы и наземных датчиков с помощью специализированного программного обеспечения, такого как, например, ROP Optimizer и Shogun (Schlumberger), задействованных при бурении горизонтальных скважин.

Модуль оптимизации механической скорости проходки (МСП) ROP Optimizer – модуль программы Perform Toolkit, использующий параметры бурения в реальном времени и вычисляющий оптимальные нагрузку на долото и частоту вращения бурильной колонны для увеличения механической скорости. Работа модуля основана на действии алгоритма Change Point 2 как математической ос-

нове для обработки данных, получаемых в режиме реального времени.

Модуль отображения рекомендаций Shogun – программа для наглядного визуального отображения рекомендаций ROP на экране бурильщика.

### АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ

Поведение поликристаллического алмазного долота (англ. polycrystalline diamond cutter – PDC) смоделировано и разделено на три этапа разрушения породы:

- 1-й этап – при малой нагрузке долото истирает породу;
  - 2-й этап – выше определенной нагрузки долото режет породу;
  - 3-й этап – после критической нагрузки накопление шлама мешает увеличению механической скорости проходки.
- В соответствии с данным алгоритмом поток данных может быть обработан

и разделен на серии однородных сегментов (рис. 1). При этом для прогнозирования поведения долота при изменении значений нагрузки на долото и частоты вращения бурильной колонны используются параметры самой последней однородной серии. При получении значений, выпадающих из последней однородной серии, выделяется новая серия (новый сегмент).

Далее строится зависимость МСП от нагрузки и оборотов (рис. 2) с учетом ограничений по таким параметрам, как:

- нагрузка (дизайн долота, компоновка низа бурильной колонны);
- скорость вращения (вибрации, ограничения приборов);
- МСП (очистка ствола, интенсивность);
- крутящий момент (верхний привод, буровой инструмент);
- перепад давления (мотор).

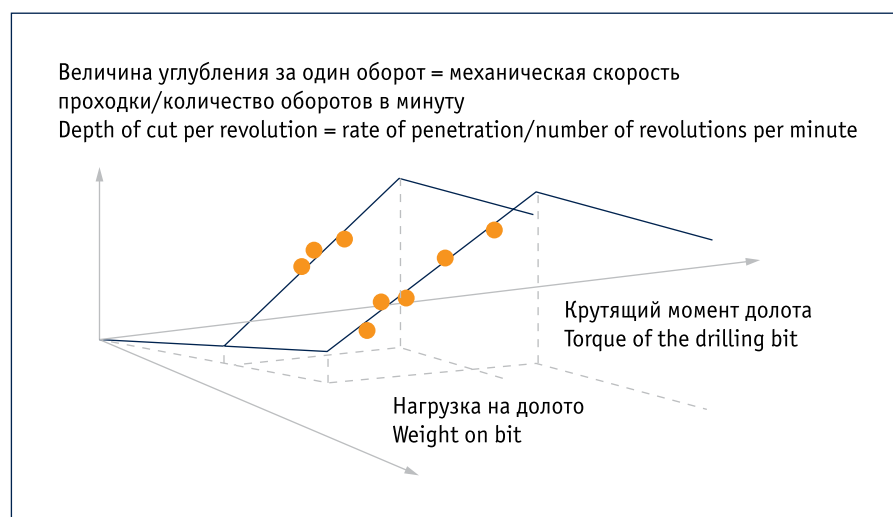


Рис. 1. Алгоритм оптимизации в схематическом виде

Fig. 1. The optimization algorithm in a schematic form

Ссылка для цитирования (for citation):

Левинсон Л.М., Хасанов Р.А. Оптимизация процесса бурения по данным телеметрических и роторных управляемых систем в режиме реального времени // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2019. № 10. С. 18–24.

Levinson L.M., Khasanov R.A. Drilling Optimization on Realtime Data from Measuring While Drilling and Rotary Steerable Systems. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2019;(10):18–24. (In Russ.)

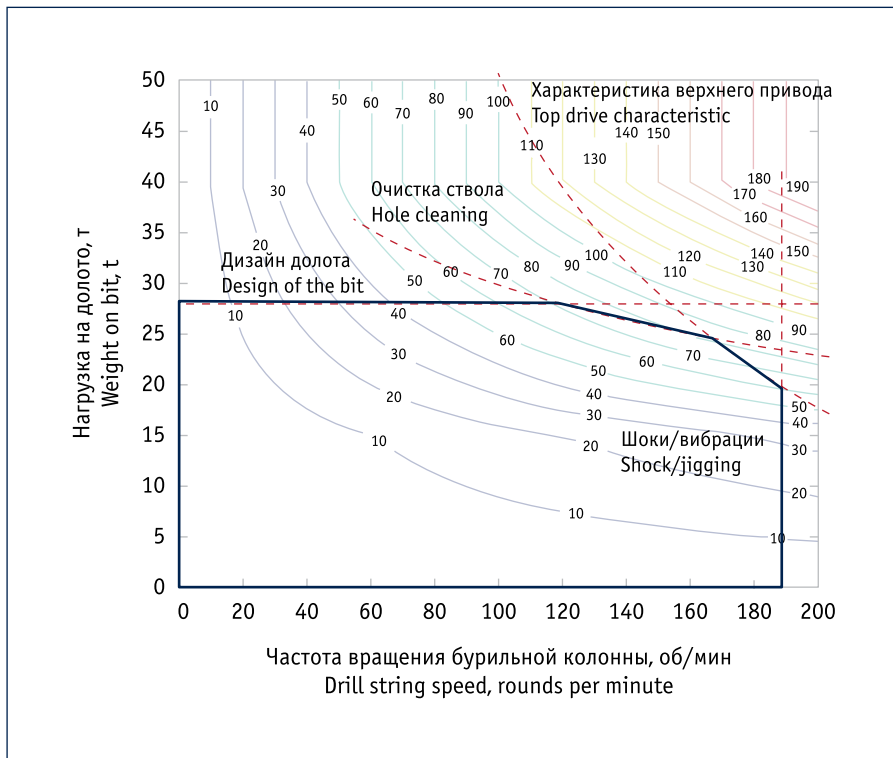


Рис. 2. Алгоритм оптимизации с учетом характеристик компоновки низа буровой колонны, оборудования и скважины  
 Fig. 2. Optimization algorithm taking into account the characteristics of the bottomhole assembly, equipment and well

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Программа оптимизации ROP Optimizer используется на большом количестве скважин, причем во всех случаях, когда были применены рекомендуемые параметры, МСП улучшилась в среднем на 20–30 % (рис. 3).

В России программа тестировалась на двух проектах, в обоих удалось добиться ускорения – на 21 и 27 % соответственно.

Оптимизация спуско-подъемных операций также производится с учетом поступающих с буровой данных, в числе которых:

- давление на стояке;
- вес на крюке;
- глубина по стволу;
- глубина долота;
- положение блока;
- крутящий момент на поверхности;
- количество оборотов в минуту;
- расход промывочной жидкости;
- статус буровой.

Обнаружение промывов буровой колонны производилось по зависимости давления от расхода.

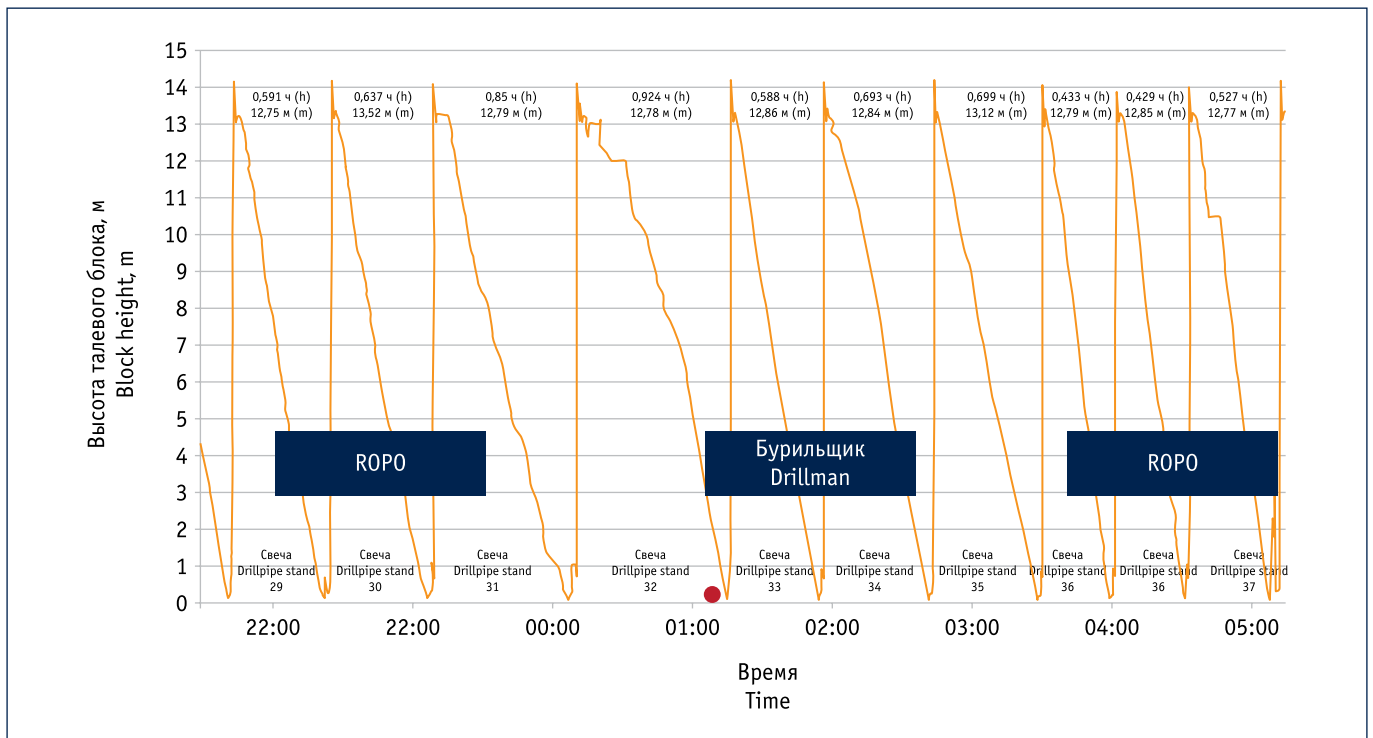


Рис. 3. Сравнение механической скорости бурения с использованием и без использования программы оптимизации: бурильщик (без использования программы): 51,60 м/2,904 ч = 17,77 м/ч; РОРО: 77,47 м/3,466 ч = 22,35 м/ч (ускорение составило 26 %)

Fig. 3. Comparison of mechanical drilling speed with and without optimization program: drillman (without program): 51.60 m/2.904 h = 17.77 m/h; ROPO: 77.47 m/3.466 h = 22.35 m/h (rate of speed was 26 %)

Разработаны методы оптимизации очистки ствола скважины, причем отдельные факторы оптимизации объединены в матрицу оптимизации бурения (Бостонскую матрицу) (рис. 4).

**ПРОЕКТ ИНТЕГРАЦИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Поскольку проектирование, сопровождение и оптимизация бурения осуществляются с применением специализированных программ разных производителей, причем зачастую данные программы имеют разнородную структуру модулей, в т. ч. с повторением однотипных расчетов, дублированием функций, что в конечном итоге требует многократного внесения исходных данных, повторного проведения расчетов, оценки результатов и т. д., авторами данной статьи предложена схема интеграции программного обеспечения в целях его оптимизации, представленная на рис. 5.

Возможности современных компьютеров, в т. ч. планшетов и смартфонов, позволяют производить ресурсоемкие вычисления и поддерживать работу больших баз данных, поэтому для начала было предложено разнородное программное обеспечение для различных сфер бурения (на примере программного обеспечения компании Schlumberger) объединить в четыре основных модуля:

- DOX – для проектирования бурения;
- РТК – для сопровождения режима бурения;
- Petrel – для геологического моделирования и сопровождения;
- MaxWell – для приема и обработки данных наземных и скважинных датчиков.

После этого четыре модуля предлагается объединить в два – «Бурение» и «Измерения», а в дальнейшем – в одну программу «Бурение», позволяющую полностью спланировать и сопроводить бурение скважины от начала и до конца (таблица).

Данная схема будет эффективной при использовании как отечественных, так и зарубежных специализированных программных продуктов. Внедрение интегрированного программного обеспечения значительно сократит потребность в финансовых, временных,

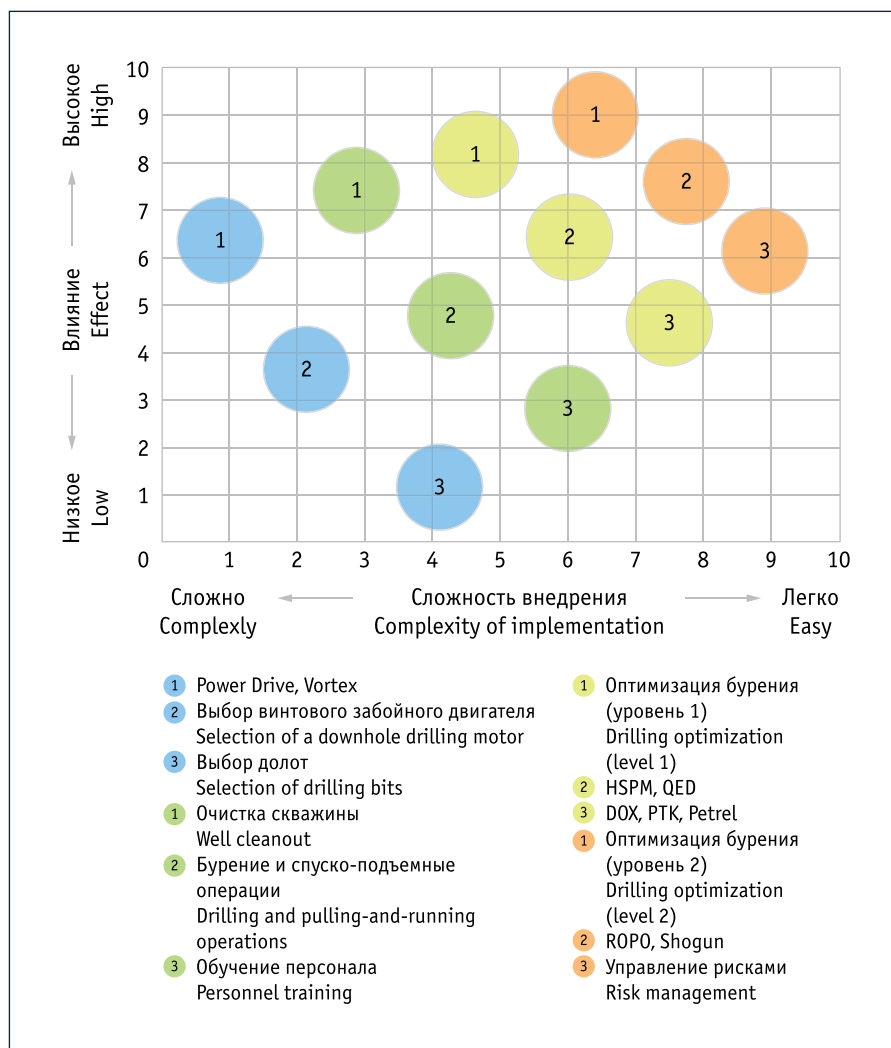


Рис. 4. Матрица оптимизации бурения (Бостонская матрица)

Fig. 4. Drilling optimization matrix (Boston matrix)

человеческих ресурсах для сервисных и добывающих компаний, позволив качественно работать при тех же суммарных затратах на большем количестве объектов с меньшими удельными затратами. Стоит отметить перспективность разработки интегрированного программного обеспечения вокруг одного программного ядра с учетом наработок лидирующих программных продуктов. Разработана схема анализа режимных параметров бурения (табл.), в которой по определенному сочетанию параметров (таких как механическая скорость, детальный механический каротаж, нагрузка на долото, вес на крюке, глубина по стволу, глубина долота, положение блока, крутящий момент на поверхности, количество оборотов в минуту, плотность раствора на входе и на вы-

ходе, расход на входе, расход на выходе, давление на стояке, перепад давления, объем в емкостях, газ) определяются причины такого поведения бурильной колонны и адекватные мероприятия.

**ВЫВОДЫ**

1. Представлены основные направления оптимизации бурения по данным телеметрических и роторных управляемых систем, специализированное программное обеспечение, алгоритм и результаты оптимизации режима бурения, спуско-подъемных операций, очистки ствола скважины, матрица оптимизации, интеграция программного обеспечения, анализ режимных параметров бурения.
2. Оптимизация бурения по данным телеметрических и роторных управ-





Статус буровой State of the drilling rig													
Промывка над забоем 0 об/мин Pump off bottom without rotation													
Параметры Parameters	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	
Давление на стояке Drill pipe pressure	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Уменьшается (1-5 с) Decreasing (1-5 seconds)	Не меняется Without change	
Перепад давления Pressure difference	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	
Объем в емкостях Capacity/size in reservoirs	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Увеличивается (1-5 мин) Increasing (1-5 minutes)	Увеличивается (1-5 мин) Increasing (1-5 minutes)	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Увеличивается (1-5 мин) Increasing (1-5 minutes)	Уменьшается (1-5 мин) Decreasing (1-5 minutes)	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Уменьшается (1-5 мин) Decreasing (1-5 minutes)	
Газ Gas	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Увеличивается (1-5 мин) Increasing (1-5 minutes)	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	Не меняется Without change	
Детализация Detailization													
Вероятные причины Probable reasons	Стабильная промывка над забоем без движения инструмента Stable pump off bottom without rotation	Промывка над забоем с расхаживанием инструмента Pump off bottom with spudding	Нормальная зависимость: при увеличении плотности на входе растет плотность на выходе Normal dependence: as the input mud weight increases, the output density decreases	Приток тяжелого флюида The influx of heavy reservoir fluid	Приток легкого флюида Influx of a light reservoir fluid of gas	Приток легкого флюида Influx of a light reservoir fluid of gas	Приток легкого флюида Influx of a light reservoir fluid of gas	Приток легкого флюида Influx of a light reservoir fluid of gas	Приток легкого флюида Influx of a light reservoir fluid of gas	Приток легкого флюида Influx of a light reservoir fluid of gas	Приток легкого флюида Influx of a light reservoir fluid of gas	Приток легкого флюида Influx of a light reservoir fluid of gas	Приток легкого флюида Influx of a light reservoir fluid of gas
Мероприятия Procedures	Продолжать промывку требуемое количество циклов циркуляции Continue pumping required number of circulation cycles	Продолжать промывку требуемое количество циклов циркуляции Continue pumping required number of circulation cycles	Выбрать требуемую плотность на входе и на выходе Select the required density at the input and output	Выбрать требуемую плотность на входе и на выходе Select the required density at the input and output	Выбрать требуемую плотность на входе и на выходе Select the required density at the input and output	Выбрать требуемую плотность на входе и на выходе Select the required density at the input and output	Выбрать требуемую плотность на входе и на выходе Select the required density at the input and output	Выбрать требуемую плотность на входе и на выходе Select the required density at the input and output	Выбрать требуемую плотность на входе и на выходе Select the required density at the input and output	Выбрать требуемую плотность на входе и на выходе Select the required density at the input and output	Выбрать требуемую плотность на входе и на выходе Select the required density at the input and output	Выбрать требуемую плотность на входе и на выходе Select the required density at the input and output	Выбрать требуемую плотность на входе и на выходе Select the required density at the input and output
Период запаздывания Delay period	-	Цикл промывки Circulation cycle	Цикл промывки Circulation cycle	Цикл промывки Circulation cycle	Забой - устье Bottom hole - well head	Забой - устье Bottom hole - well head	Забой - устье Bottom hole - well head	Забой - устье Bottom hole - well head	Забой - устье Bottom hole - well head	Забой - устье Bottom hole - well head	Забой - устье Bottom hole - well head	Забой - устье Bottom hole - well head	Забой - устье Bottom hole - well head
Мероприятия Procedures	Проверить работу персонала на емкостях, состоянии емкостей Check the work of personnel on the cubic capacities, condition of tanks	Проверить работу персонала на емкостях Check the work of personnel on the cubic capacities	Остановить циркуляцию, поднять инструмент с ревизией Stop the circulation, pick up the instrument, audit it	Остановить циркуляцию, определить уровень и интенсивность поглощения, меры по результатам Stop the circulation, determine the level and intensity of drilling mud absorption, take action on the audit results	Остановить циркуляцию, определить уровень и интенсивность поглощения, меры по результатам Stop the circulation, determine the level and intensity of drilling mud absorption, take action on the audit results	Остановить циркуляцию, определить уровень и интенсивность поглощения, меры по результатам Stop the circulation, determine the level and intensity of drilling mud absorption, take action on the audit results	Остановить циркуляцию, определить уровень и интенсивность поглощения, меры по результатам Stop the circulation, determine the level and intensity of drilling mud absorption, take action on the audit results	Остановить циркуляцию, определить уровень и интенсивность поглощения, меры по результатам Stop the circulation, determine the level and intensity of drilling mud absorption, take action on the audit results	Остановить циркуляцию, определить уровень и интенсивность поглощения, меры по результатам Stop the circulation, determine the level and intensity of drilling mud absorption, take action on the audit results	Остановить циркуляцию, определить уровень и интенсивность поглощения, меры по результатам Stop the circulation, determine the level and intensity of drilling mud absorption, take action on the audit results	Остановить циркуляцию, определить уровень и интенсивность поглощения, меры по результатам Stop the circulation, determine the level and intensity of drilling mud absorption, take action on the audit results	Остановить циркуляцию, определить уровень и интенсивность поглощения, меры по результатам Stop the circulation, determine the level and intensity of drilling mud absorption, take action on the audit results	Остановить циркуляцию, определить уровень и интенсивность поглощения, меры по результатам Stop the circulation, determine the level and intensity of drilling mud absorption, take action on the audit results

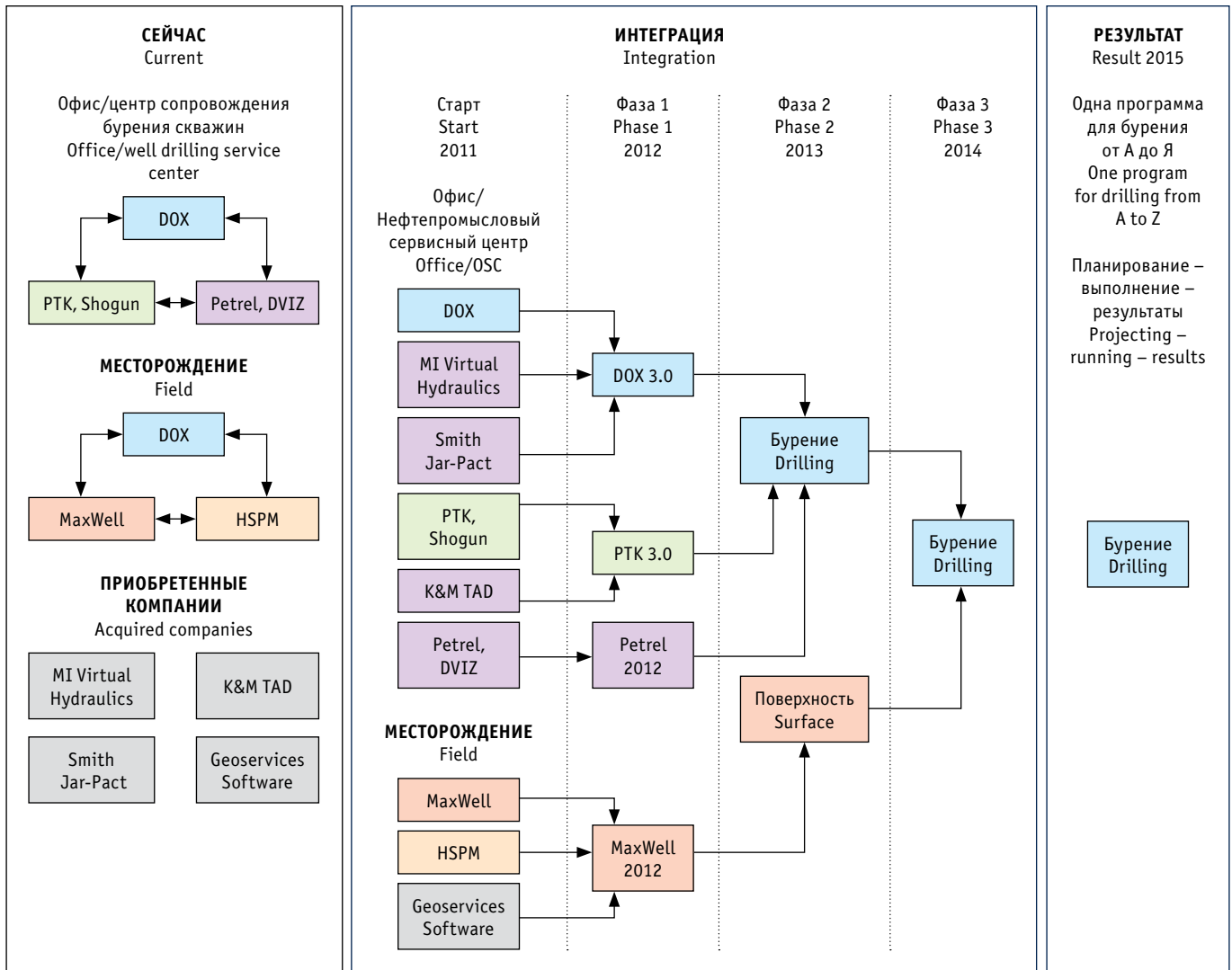


Рис. 5. Проект интеграции программного обеспечения, предназначенного для оптимизации бурения  
 Fig. 5. Software integration project designed to optimize drilling

ляемых систем в режиме реального времени в целях уменьшения затрат согласуется с актуальной тенденцией последних лет – внедрением бережливого производства, методик кайдзен (японская методика непрерывного совершенствования процессов, базирующаяся на принципах аккуратности, соблюдения порядка, поддержания чистоты, стандартизации процессов и дисциплине), «6 Сигма» (англ. 6 Sigma, ключевыми элементами являются удовлетворение потребителя, определение процессов, их показателей и методов управления процессами, командная работа и вовлечение персонала), лин-методики (от англ. lean production – методика, основанная на стремлении минимизировать потери всех видов),

методики непрерывного улучшения, в условиях современного производства дающих высокий производственный и экономический эффект ускорения ввода скважин в эксплуатацию и повышения качества пробуренных скважин.

3. Оптимизация является важной частью цифровизации процесса бурения и подготовкой к переходу на модель цифрового месторождения.

4. Бурение скважин со сверхбольшими отходами невозможно без оптимизации бурения по данным телеметрических и роторных управляемых систем ввиду критических нагрузок на инструмент и буровое оборудование при бурении, спуско-подъемных операциях, заканчивании скважин.

5. Оптимизация процесса бурения имеет большие перспективы в связи с ростом количества и повышением точности датчиков, скорости передачи данных на поверхность.

**Литература:**

1. Хасанов Р.А. Оптимизация строительства горизонтальных скважин в ОАО АНК «Башнефть» // Аналитический журнал «Нефте-сервис». 2014. № 2. С. 54–55.

**References:**

1. Khasanov R.A. Horizontal Wells Construction Optimization in Bashneft JSC. Analiticheskiy zhurnal "Nefteservis" = Nefteservice Analytical Journal. 2014;(2):54–55. (In Russ.)