ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СКВАЖИНАМИ С ЭПУ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

ВОЛОВОДОВ Александр Васильевич
Главный специалист по технологии добычи ООО «ПК «Борец», к.т.н.,
+7 (495) 660-21-90 (доп. 5275), +7 915-190-71-28, volovodov_av@borets.ru

Интеллектуальная система управления (ИСУ) скважинами с электропогружными установками (ЭПУ)* «Борец» была создана на основе цифрового двойника и направлена на повышение эффективности управления скважиной путем автоматизации регламентных процедур при соблюдении технологических требований на всех этапах ее эксплуатации: от запуска до отказа. Проведенные опытно-промысловые испытания (ОПИ) показали, что использование ИСУ помогает оптимизировать работу скважин и снижать затраты на их обслуживание, но при этом выявили необходимость функционального расширения системы и ее эволюционной трансформации. Планируется, что после доработки ИСУ она послужит базовым элементом для построения интеллектуального месторождения.

Система «Борец» представляет собой многоуровневую ИСУ на базе серийной станции управления (СУ) «Борец» с интеллектуальным программным модулем, в основе которого лежит цифровой двойник скважины.

Система обеспечивает оптимальный режим работы скважины при изменяющихся условиях эксплуатации, не допуская критических состояний и отключений, а также непрерывный предиктивный анализ показателей.

ИСУ может применяться в составе УЭЦН (УЭЛН) или УЭВН** с ТМС или системой верхнего уровня, а также без них.

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК СКВАЖИНЫ

Один из центральных элементов ИСУ – цифровой двойник (англ. Digital Twin) скважины (рис. 1). В соответствие с наиболее распространенным в мировой практике определением, он представляет собой математическую модель, на вход которой в реальном времени поступают данные с датчиков и контроллера СУ. Модель имитирует (также в реальном времени) совместную работу всех основных элементов скважины (пласт, насос, подъемные трубы, двигатель, кабель и др.), адаптирована для контроллера СУ, оснащена базой знаний и обеспечивает работу ИСУ при потере сигнала ТМС. Модель защищена свидетельством Роспатента.

В ИСУ имеются программные средства по автоматической настройке модели «на факт» по замеренным параметрам (дебит, $P_{прием}$ / $H_{дин}$) и результатам автоматического сканирования режима скважины.

Цифровой двойник позволяет получать параметры процесса в любой точке объекта в любой момент времени, чем снимается проблема отсутствующих (нет сигнала с датчика) или дискретных (дебит, динамический уровень) замеров или не замеряемых параметров (газосодержание в насосе).

Следует отметить, что на рис. 1 приведены схематичные графики, отображающие последовательность получения и использования расчетной информации, а не реальный пример работы математической модели. Это связано с тем, что дисплей контроллера СУ «Борец» оснащен текстово-символьной индикацией и не графическим отображением, позволяющим сделать скриншот.

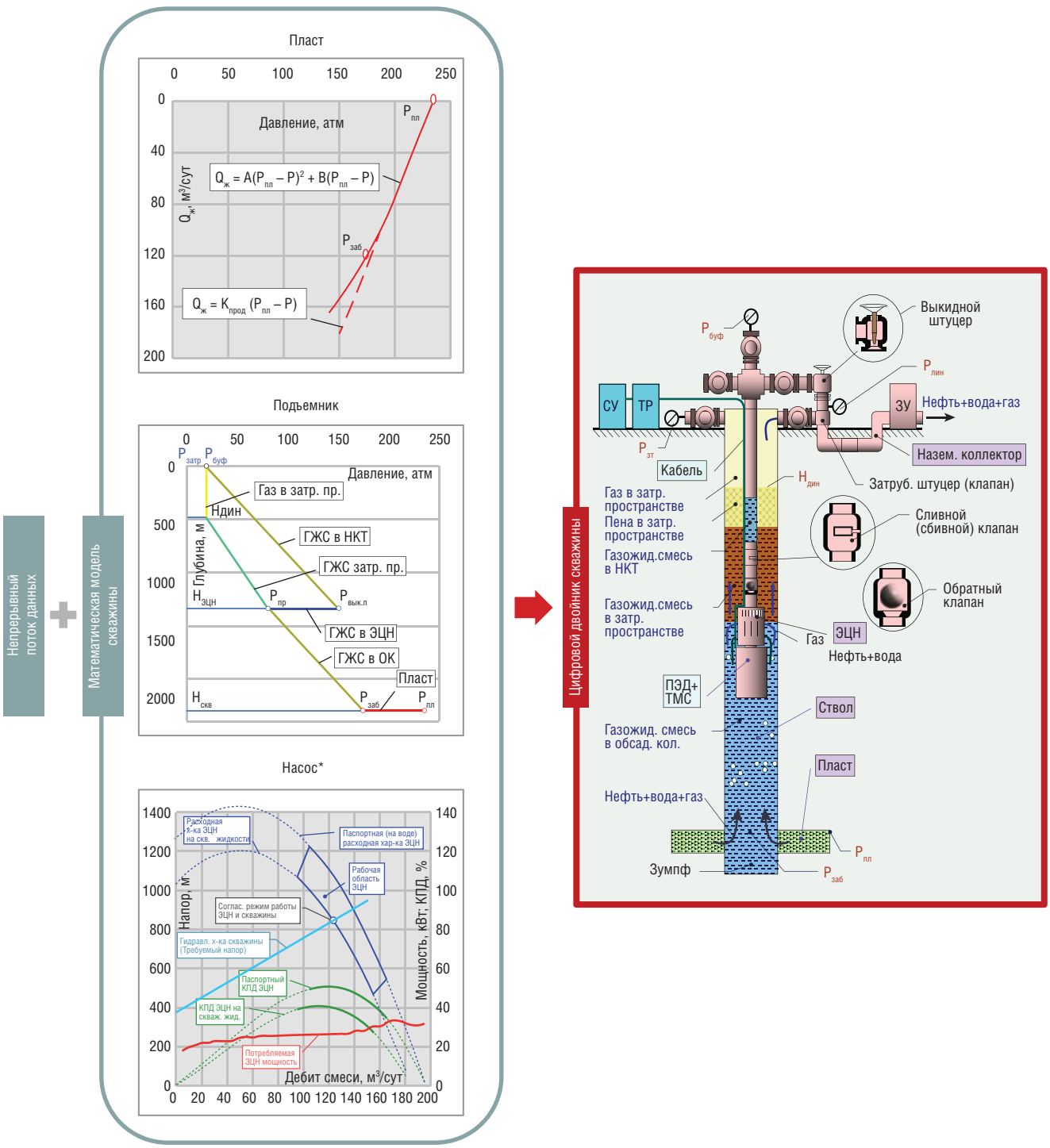
В модели зависимости давления от глубины, представленной на рис. 1, изменение свободного газосодержания определяется барботажем, а не разгазированием. Это связано с тем, что в «затрубье» находится неподвижный столб нефти, выделение газа из которой уже завершилось. Там, где есть поток жидкости (колонны обсадных труб и НКТ и т.д.), разгазирование учитывается кривой, которая вводится в табличном

Таблица 1. Функции ИСУ «Борец»

Функция	Описание	Эффект от применения
«АвтоВНР»	Автоматический ВНР после ремонта или длительного простоя скважины с выполнением всех технологических требований и ограничений	– минимизация времени ВНР в осложненных условиях; – предотвращение остановок и осложнений; – сокращение затрат на обслуживание
«Оптимизация»	Поиск и поддержание целевого параметра ($Q_{жид_max}$, $P_{прием}$ / $H_{дин}$, $I_{раб}$, $U_{опт}$, $T_{цикл_пер.реж.}$)	– обеспечение целевого режима; – максимизация дебита; – минимизация тока; – стабилизация периодического режима
«Предотвращение отключений»	Корректировка режима, обеспечивающая уход от отключения по защите ЗСП, T_{max}, P_{min}, $P_{вык_max_ЭВН}$)	Сокращение: – внутрисменных простоев скважины; – потерь добычи нефти; – затрат на обслуживание
«Виртуальный измеритель»	Расчет $Q_{жид}$, $H_{дин}$ / $P_{прием}$, напора насоса, УРЭ	Непрерывный мониторинг, управление, диагностика и аналитика

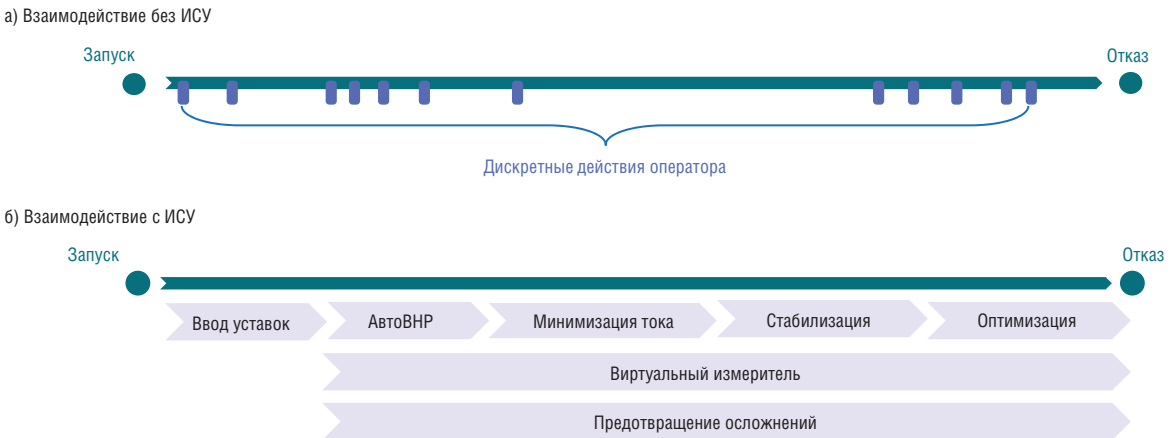
* В данной статье используется термин ЭПУ вместо более привычного читателям «Инженерной Практики» ВСО (внутрискважинное оборудование). Это связано с тем, что ВСО кроме ЭПУ включает в себя пакеры, разъединительные клапаны, греющие кабели и другие элементы, управление которыми на сегодняшний день не входит в задачи ИСУ «Борец».
** В данной статье используется термин УЭЦН/ЭЦН, поскольку УЭЛН/ЭЛН в технической документации ООО «ПК «Борец» отсутствует.

Рис. 1. Цифровой двойник скважины



* Данный тип НРХ приведен в ТУ Минхиммаш и ОКБ БН на ЭЦН-130, работе И.Т. Мищенко «Скважинная добыча нефти», ТУ «Борец» на ЭЦН-60, ЭЦН-100, ЭЦН-200. От такого типа НРХ разработчики постепенно уходят, а в контролер СУ вводятся фактические НРХ насоса.

Рис. 2. Взаимодействие между функциями без ИСУ и с ИСУ



виде в контроллер СУ. Кривая может быть получена экспериментально или по известным формулам (Штофа, Дунюшкина, Ляпкова).

ФУНКЦИОНАЛ СИСТЕМЫ

ИСУ оснащена более 20 функциями – программами, которые выполняют определенную последовательность действий в зависимости от событий и условий. Функции могут работать автономно или в составе четырех более крупных функций (табл. 1). Две из последних («АвтоВНР» и «Оптимизация») относятся к числу управляющих. Они управляют скважиной так, чтобы была достигнута цель, заданная пользователем (например, частота вращения привода F, забойное давление Рзаб) или определяемая программой (например, максимально возможный дебит, минимально возможный потребляемый ток).

«АвтоВНР» осуществляет автоматический вывод на режим и работает следующим образом:

Таблица 2. Область изменения параметров работы скважин при проведении ОПИ ИСУ

Параметры	Значение
Газосодержание, %	До 60
Вязкость дегазированной нефти, сП	До 10
Температура, °С	До 145
Давление на выкиде ЭВН, атм	До 250
Погружение под уровень, м	До 30
Недостаточный приток	До 0,25·Qnom
Сигнал ТМС	Есть/нет

- расчет и старт на начальной частоте Fнач;
- набор частоты F в зависимости от дебита жидкости и концентрации взвешенных частиц (КВЧ);
- коррекция защиты от срыва подачи (ЗСП);
- коррекция F при недогрузе, нехватке напора, подъема $T_{двиг}$ до T_{max};
- достижение конечных параметров ($F_{кон}$, $I_{раб}$, $P_{заб}$, $H_{дин}$);
- конец откачки жидкости глушения;
- окончательная коррекция ЗСП;
- запись конечных параметров в память.

Функция «Оптимизация» проводит непрерывный поиск и поддержание целевых параметров на основе методов автоматического регулирования и оптимального управления.

Функция «Предотвращение отключений» (по защитам) при приближении того или иного режимного параметра (загрузка, Рприем, Тдвиг) к аварийно-опасному значению меняет работу привода (частоту, напряжение и др.) таким образом, чтобы уйти из опасной области и не допустить отключения скважины по защите. При этом информация о виде осложнения (недогруз, перегруз, перегрев), параметрах вступившей в работу предотвращающей функции индицируется на дисплее контроллера СУ и передается через систему удаленного управления на верхний уровень.

Функция «Виртуальный измеритель» является виртуальным мультиприбором и передает из цифрового двойника в другие части системы основные расчетные параметры: дебит жидкости, динамический уровень, напор, подачу насоса, газосодержание на приеме, удельный расход электроэнергии (УРЭ) и т.д. Параметры поступают в блок диагностики, систему поддержки принятия решения, на дисплей

контроллера СУ, верхний уровень управления и в другие подсистемы. Это позволяет контроллеру СУ автоматически оптимизировать работу скважины, оператору (электромонтеру) и диспетчеру – своевременно выявлять и устранять текущее осложнение, технологу – проводить анализ и прогноз. Функция существенно расширяет возможности системы, позволяет управлять скважиной при отсутствии сигналов ТМС и других датчиков.

Функции расположены в меню «Интеллект» контроллера. Модульное исполнение позволяет настраивать функциональность в широких пределах. Каждая функция оснащена собственным меню с уставками и параметрами, что позволяет ее включать, выключать, делать видимой или невидимой.

Без ИСУ ввод и настройки уставок, переключение функций производятся вручную, что приводит к высокому влиянию человеческого фактора как источника ошибок, дискретности и запаздыванию при принятии решений (рис. 2а).

ИСУ лишена этого недостатка и осуществляет непрерывное автоматическое управление скважиной на всех этапах ее эксплуатации: от запуска до отказа. Специальная служебная программа обеспечивает взаимодействие функций. Управляющие функции сменяют друг друга последовательно, параллельно им работают программы по предотвращению осложнений и виртуальный измеритель (рис. 2б).

Однако наряду с положительными сторонами усложнение функционала приводит к увеличению количества настроек в ИСУ, заметному росту нагрузки на оператора, ухудшению эргономики и возникновению ошибок.

Данная проблема решена путем автоматизации ввода данных за счет использования встроенных справочников (ПЭД, насос и др.), файловой загрузки через USB или, при наличии верхнего уровня управления, – удаленной загрузки, а также благодаря автоматической настройке основных параметров: частоты, напряжения, ЗСП, амплитуды и времени воздействия на осложнения и т.д.

ПРОВЕДЕНИЕ ОПИ

В 2014-2018 годах были проведены ОПИ в нескольких нефтяных компаниях (НК) России и за рубежом. Испытания проводились на 25 скважинах, оснащенных УЭЦН и УЭВН, параметры которых изменялись в широких пределах (табл. 2).

Цель испытаний – проверка автоматического, без вмешательства человека, выполнения заявленных действий – была достигнута.

Также зафиксированы следующие положительные моменты:

ВЫДЕРЖКИ ИЗ ОБСУЖДЕНИЯ

Вопрос: *Александр Васильевич, Вы упомянули разработку пяти интеллектуальных модулей поддержки принятия решения, среди которых назвали модуль «Реализатор». Не могли бы Вы рассказать о нем немного подробнее?*

Александр Воловодов: Данный модуль отвечает за выработку рекомендаций. Он внедрен на нижнем уровне в контроллере СУ. Благодаря ему ИСУ диагностирует состояние и вырабатывает решения, которые поступают на исполнительные механизмы.

В дальнейшем модуль будет внедрен и на верхнем уровне, что позволит решать не только оперативные, но и стратегические задачи.

Вопрос: *То есть те решения, которые сейчас принимает технолог, геолог нефтяной компании, сервисная организация, будет принимать ИСУ без участия человека?*

А.В.: Да, система может и будет принимать решения в полностью автоматическом режиме.

Вопрос: *А если что-то пойдет не так, как найти ответственного за принятое решение? Условно говоря, с кого спрашивать?*

А.В.: Чтобы таких ситуаций не возникло, предусмотрено эволюционное, поэтапное развитие системы. На ближайшем этапе «Советчик» будет предлагать решения, но «последнее слово» будет оставаться за человеком. Иными словами, если человек не согласен с предлагаемым решением, он может скорректировать его путем нажатия соответствующих кнопок. Если же в процессе этого взаимодействия и «притирки» человеко-машинной системы инженер приходит к выводу, что компьютер начинает работать правильно, он может перейти в режим автоматической реализации мер, выработанных «Советчиком».

Вопрос: *Вы назвали три уровня управления системой: локальный, удаленный и диагностический. На основе каких принципов были построены для них математические модели, какие физические основы в них заложены и каким образом система принятия решений обучается?*

А.В.: Математические модели на всех трех уровнях описывают физические, гидравлические, химические, теплофизические, механические процессы в основных элементах системы «скважина – пласт», колонне обсадных и подъемных труб, насоса, двигателя и других узлов ЭПУ. Используются общепринятые уравнения. Модель скважины в целом имитирует совместную работу элементов.

Имеется база знаний, представляющая собой причинно-следственную матрицу, наработанную экспертами, которая постоянно пополняется и уточняется. В ИСУ имеются программные средства по автоматической настройке модели на факт по замеренным параметрам (дебит, Рприем / Ндин) и результатам автоматического сканирования режима скважины.

Вопрос: *Не могли бы Вы пояснить алгоритм работы модели на примере?*

А.В.: Можно привести пример работы модели, используемой в функции «Оптимизация». На основе данных от датчиков и уставок контроллера СУ определяются приточная характеристика (индикаторная диаграмма) пласта, напорно-расходные характеристики скважины (требуемый напор) и насоса (развиваемый напор). По кривой притока вычисляется дебит и добычной потенциал скважины, по напорно-расходным кривым – подача насоса. Если выявлен резерв по добыче и имеется разрешение, то начинается максимизация дебита. Если подача меньше минимально допустимой величины, а режим эксплуатации – постоянный, то проводится увеличение частоты или переход на периодический режим эксплуатации.

Еще один пример приведен выше при описании алгоритма работы функции АвтоВНР.

- увеличение добычи нефти / снижение потерь нефти на 3-6%;
- сокращение внутрисменных простоев по ЗСП, Tmax, Pmin на 20-25%;
- снижение потребляемого тока на 3-6%;
- снижение затрат на обслуживание на 10-20%;
- погрешность виртуальных измерителей составила 1-10%;
- отсутствие отказов по причине ИСУ.

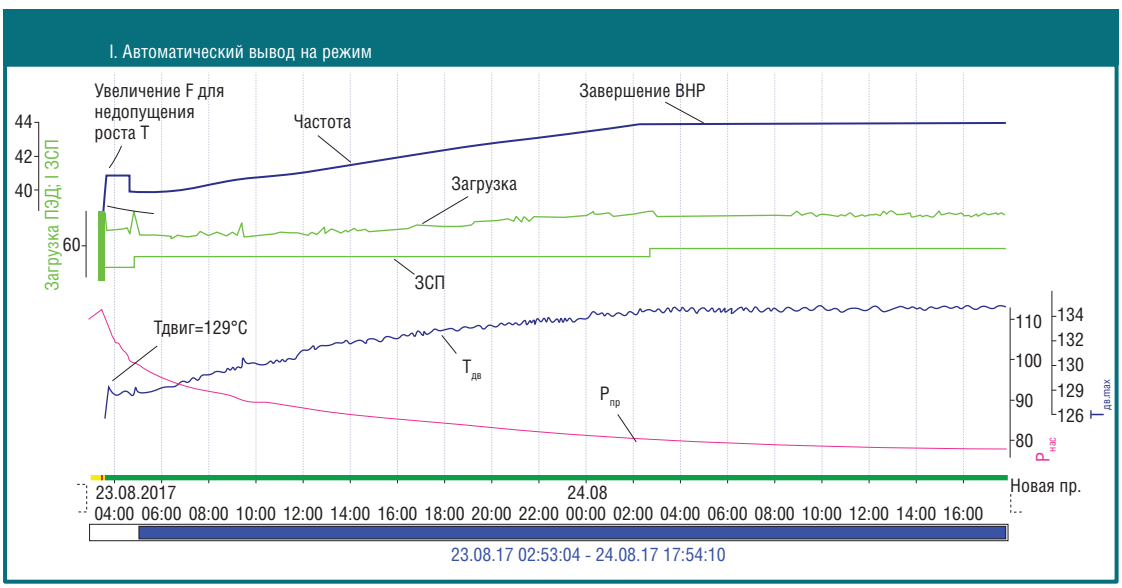
Приведенные примеры работы ИСУ при испытаниях соответствуют четырем функциям (рис. 3).

ЭВОЛЮЦИЯ ИСУ

Далее ИСУ развивалась по направлениям:

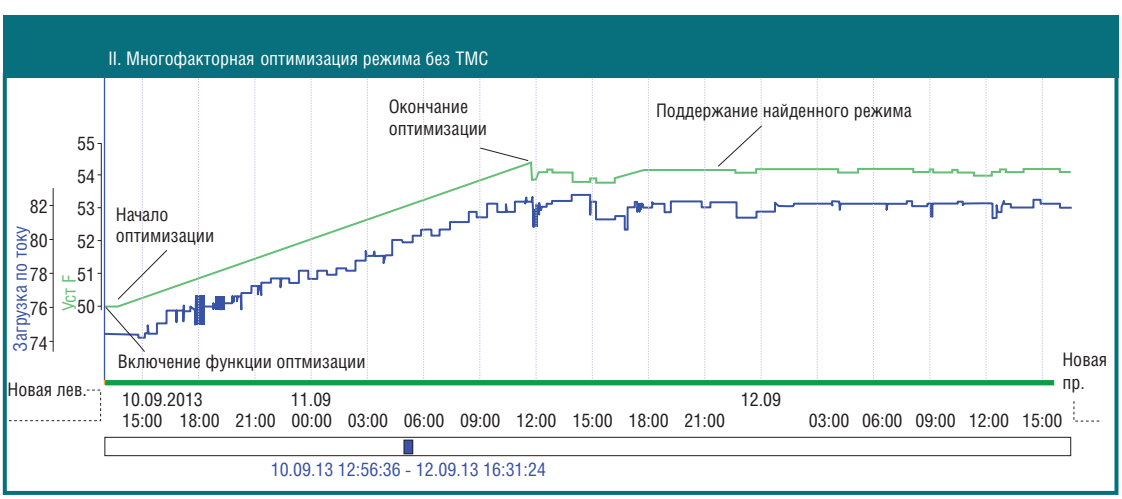
- иерархическое и функциональное расширение;
- интеграция процессов в единый замкнутый цикл.

Рис. 3 (I, II). Примеры работы ИСУ при ОПИ



Число скважин: 2
Срок испытаний: 2-4 сут

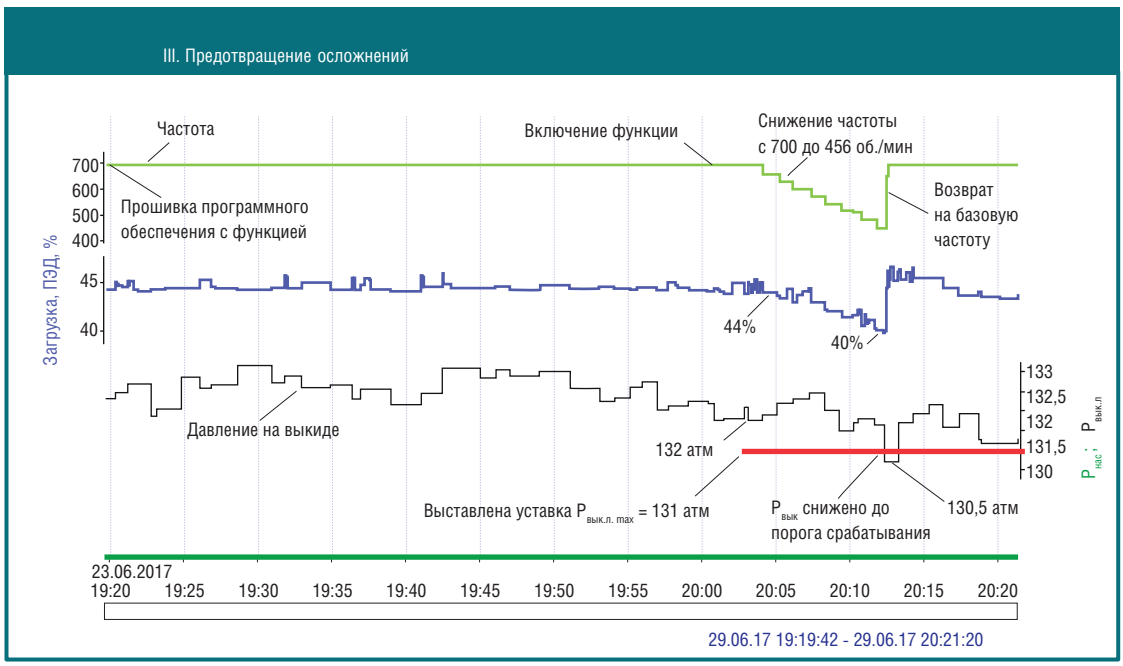
Суточное сокращение простоев: 1,2 ч/скв.



Число скважин: 6
Срок испытаний: 60-90 сут

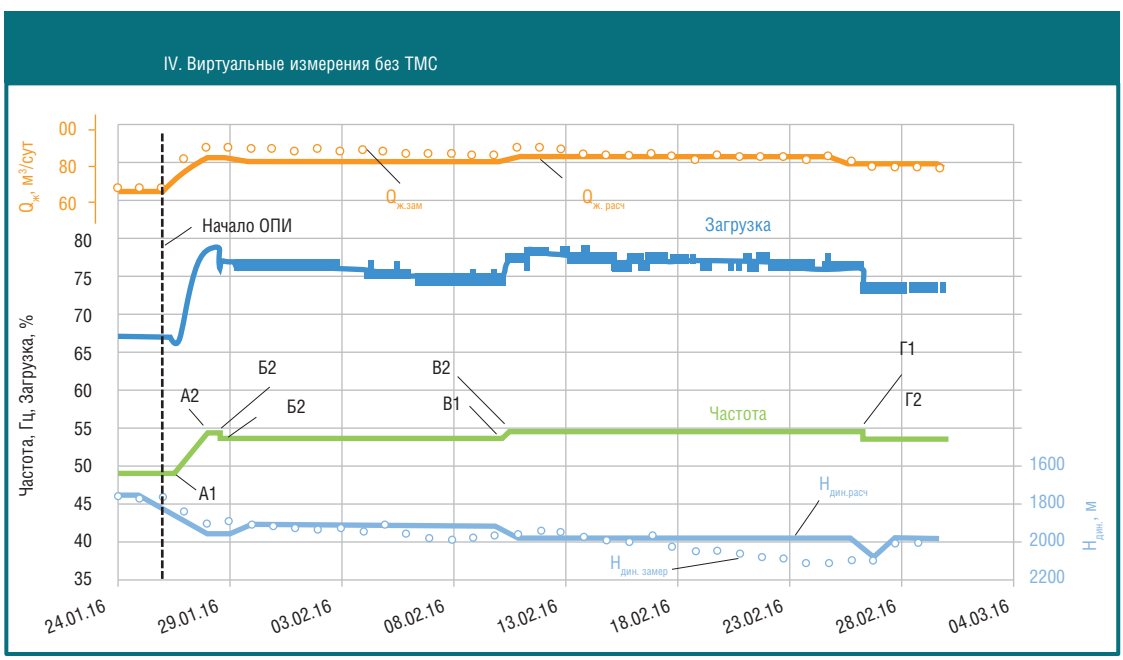
Прирост Qж: 6-15%

Рис. 3 (III-IV). Примеры работы ИСУ при ОПИ



Число скважин: 15
Срок испытаний: 2-200 сут

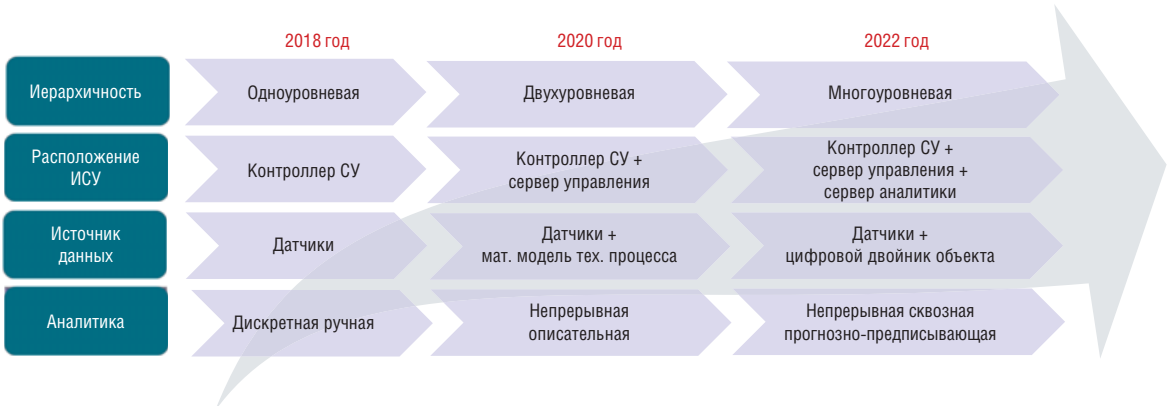
Суточное сокращение простоев: 1,5 ч/скв.



Число скважин: 5
Срок испытаний: 5-90 сут

Погрешность расчета Qж: 6%

Рис. 4. Эволюция ИСУ в 2018-2022 годах



В 2018-2020 годах иерархия системы усложнилась: появились верхние уровни управления, система стала распределенной, датчики как источники данных были дополнены цифровым двойником объекта, дискретная ручная аналитика трансформировалась в непрерывную сквозную, прогнозно-предписывающую (рис. 4).

ИСУ получила развитие в пилотном проекте в одной из НК. Пилотный объект состоял из группы прокатных скважин, использовалось три уровня управления:

- локальное управление на уровне СУ;
- удаленное управление на уровне диспетчера сервисного центра «Борец»;
- аналитика на уровне технолога сервисного центра «Борец» (рис. 5).

В течение проекта, который длился более года, ручные офлайн сигналы и команды замещались обычными онлайн, а затем – интеллектуальными онлайн сигналами и командами.

После завершения пилотного проекта был осуществлен переход к промышленному использованию ИСУ на расширенной группе скважин. Начата интегра-

Рис. 5. Развитие ИСУ на пилотном объекте

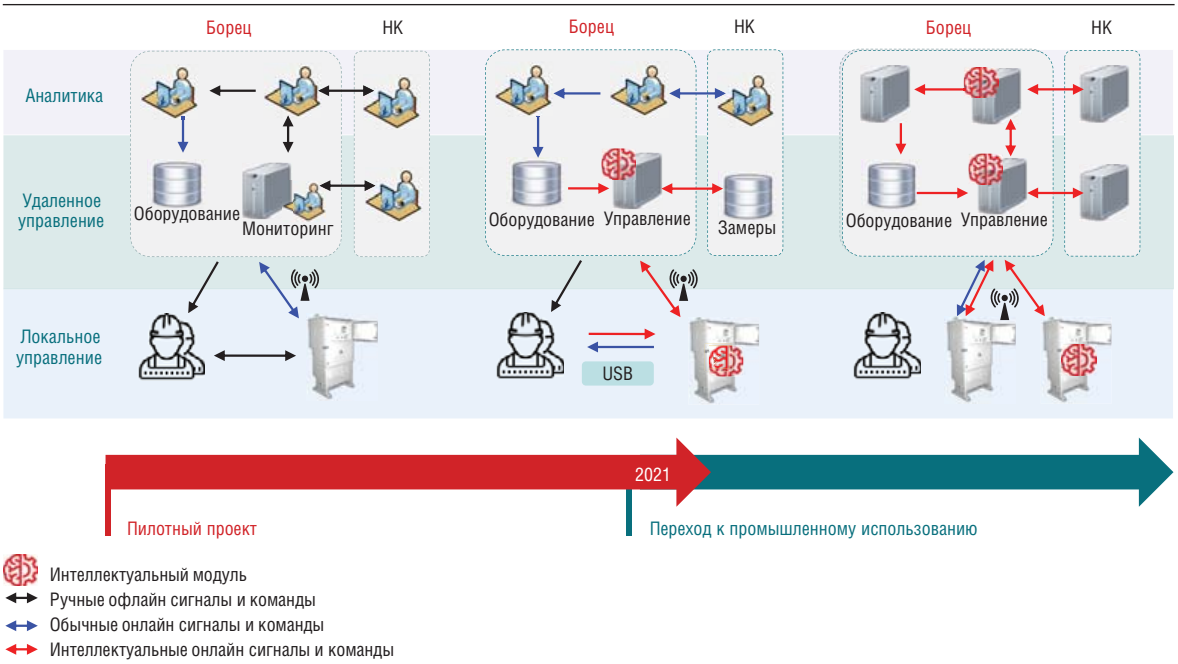


Рис. 6. Цифровизация ввода данных

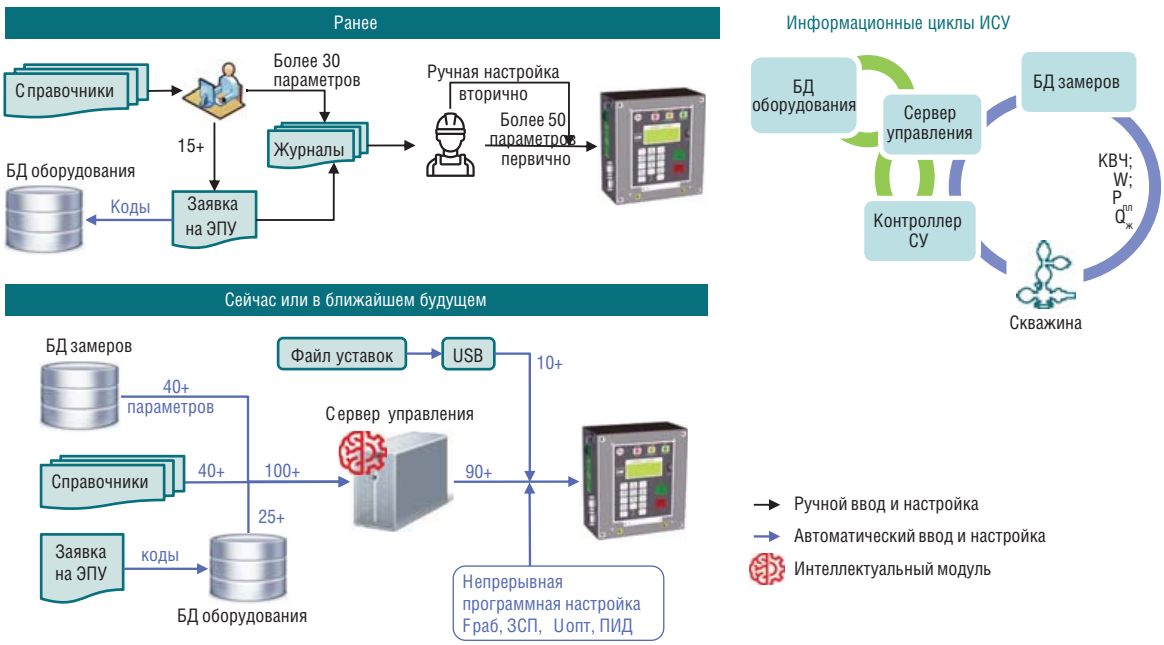


Таблица 3. Эволюция функциональности ИСУ

Уровень управления	Функция, свойства	Раньше	Сейчас	Будет
Аналитика (технолог)	Дискретная ручная описательная аналитика	•	•	•
	Непрерывная описательная диагностика и аналитика режимов		•	•
	Прогнозная аналитика, формирование технологической документации			•
	Планирование ресурсов, работ и услуг			•
	Интеграция в ИТ-ландшафт предприятия			•
Удаленный (диспетчер)	Ручное управление	•	•	•
	Цифровое управление СУ ЭПУ «Борец»		•	•
	Цифровое управление СУ ЭПУ всех производителей			•
	Интеллектуальное управление			•
Локальный (СУ ЭПУ)	Базовый набор автоматических команд	•	•	•
	Предотвращение отключений по защитам		•	•
	Автоматическое обновление данных об оборудовании и режиме*		•	•
	Расчет дебита и других параметров*		•	•
	Автоматический вывод на режим		•	•
	Оптимизация режима по заданному критерию		•	•
	Оптимальное управление на всех этапах «Запуск – ВНР – Эксплуатация»		•	•
	Исследование скважины			•
* Функция также реализована или будет реализована на верхнем уровне управления				

Рис. 7. Управление ИСУ на верхнем уровне

ция ИСУ «Борец» в ИТ-ландшафт НК, автоматизация ввода данных доведена почти до 100%, реализована программная настройка функций. Информационные циклы ИСУ были замкнуты и приведены в соответствие с производственными циклами (рис. 6). Это позволило своевременно без ошибок и дублирования обновлять информацию, сократить трудоемкость ручной работы, проводить онлайн-расчеты, диагностику и анализ.

Если раньше информация из справочников и журналов поступала от инженера к электромонтеру, который вносил десятки первичных и вторичных настроек в контроллер СУ, то сейчас цифровые потоки поступают из базы данных (БД) замеров и БД оборудования через серверы управления и систему удаленного доступа в контроллер СУ.

Функциональность ИСУ заметно возросла, и в обозримом будущем эта тенденция будет развиваться (табл. 3).

УПРАВЛЕНИЕ НА ВЕРХНЕМ УРОВНЕ

Для управления на верхнем уровне разработаны экранные формы «Умная скважина» и «Умное месторождение» (рис. 7), которые позволяют контролировать все замеренные и расчетные параметры, получать тренды и характеристики скважин и узлов оборудования, настраивать функции нижнего уровня на оптимальный режим. Формы учитывают требования эргономики, удобство и быстроту восприятия и принятия решений.

На верхнем уровне также имеются экранные инструменты «Умная скважина» и «Умное месторождение» для диагностики и аналитики, которые позволяют получать сводки с отклонениями от проектного режима, проводить диагностику и аналитику в непрерывном режиме, получать компьютерные рекомендации по оптимизации и уходу от осложнений и реализовывать рекомендации в автоматическом режиме (рис. 8).

Разрабатываются интеллектуальные модули поддержки принятия решения: «Цифровой диагност», «Аналитик», «Советчик», «Реализатор».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и успешно испытана интеллектуальная система управления скважинами с ЭПУ, оснащенная цифровым двойником.

Создан единый замкнутый цикл интеллектуально автоматизированных процессов, обеспечивающий непрерывную оптимизацию и улучшение показателей эксплуатации скважин.

Заложены основы интеллектуальной скважины, которая в дальнейшем станет базовым элементом для построения интеллектуального месторождения.

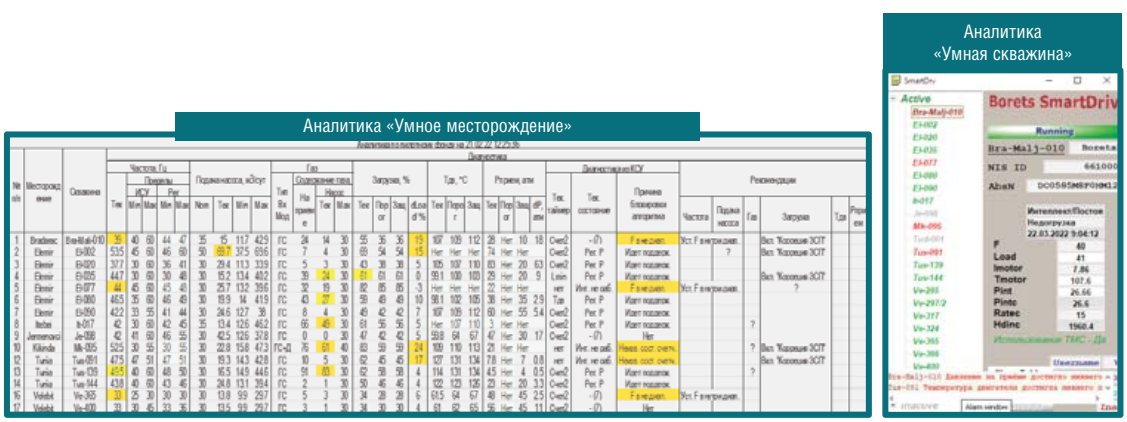



Рис. 8. Диагностика и аналитика