

Интегральная модель энергоэффективности цифрового актива

Еникеев Р.М.¹, Топольников А.С.²

¹ПАО АНК «Башнефть», Уфа, Россия, ²ООО «РН-БашНИПнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия
topolnikovas@bnipi.rosneft.ru

Аннотация

Работа посвящена описанию интегральной модели нефтяного месторождения для оценки изменения его энергоэффективности при заданных сценарных условиях разработки. Модель объединяет в себе основные элементы месторождения: пласт, механизированную добычу, систему сбора, подготовки и транспортировки скважинной продукции, систему поддержания пластового давления. Эти элементы представлены «цифровыми двойниками», которые находятся во взаимодействии друг с другом. Построенная для одного из месторождений Башкирии интегральная модель после адаптации на фактические данные позволяет проводить расчет изменения энергоэффективности всех потребителей электроэнергии на месторождении при сохранении текущих технологических параметров и заданных сценарных условий.

Материалы и методы

Для каждого элемента месторождения создается «цифровой двойник», моделирующий происходящие внутри него процессы. Для пласта используется метод материального баланса и балансовых кривых, для моделирования течения многофазного потока в скважине и элементах наземной инфраструктуры — набор эмпирических корреляций для расчета перепада давлений и температур в совокупности с моделью нелетучей нефти и композиционной моделью для расчета фазового равновесия, для

моделирования насосов, теплообменников, сепараторов и других элементов применяются их паспортные характеристики. При интегральном моделировании «цифровые двойники» отдельных элементов объединяются в рамках единого алгоритма.

Ключевые слова

интегральная модель, энергоэффективность, цифровой двойник, разработка месторождения, механизированная добыча

Для цитирования

Еникеев Р.М., Топольников А.С. Интегральная модель энергоэффективности цифрового актива // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 7. С. 78–83. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-7-78-83

Поступила в редакцию: 17.11.2023

OIL PRODUCTION

UDC 67.03 | Original Paper

The integrated model of a digital asset energy efficiency

Enikeev R.M.¹, Topolnikov A.S.²

¹ANK “Bashneft” PJSC Ufa, Russia, ²“RN-BashNIPneft” LLC (“Rosneft” PJSC Group Company), Ufa, Russia
topolnikovas@bnipi.rosneft.ru

Abstract

The paper is devoted to the description of an oil field integral model for the estimation of its efficiency change under the given conditions of the field production. The model combines the main field elements: the reservoir, artificial lift, gathering facilities, production treatment and transporting, the reservoir pressure maintenance system. These elements are presented as “digital twins”, which interacts with each other. The integrated model built up for one of the Bashkiria fields allows to calculate energy efficiency changes of all consumers at the field for the maintaining the current technological parameters and the specified scenario changes.

Materials and methods

For each of the elements of the oilfield the “digital twin” is constructed, which model the processes inside it. For the reservoir the material balance method and balanced curves are used, for the modeling of multiphase flow in the well and in the elements of ground infrastructure the set of empirical correlations for calculation of pressure and temperature drop with accordance with black oil model and composite model for phase equilibrium are employed, for modeling of pumps,

heat exchangers, separators and other elements their passport characteristics are used. With integrated modeling “digital twins” of different elements are united within the framework of a single algorithm.

Keywords

integrated model, energy efficiency, digital twin, field production, artificial lift

For citation

Enikeev R.M., Topolnikov A.S. The integrated model of a digital asset energy efficiency. Exposition Oil Gas, 2023, issue 7, P. 78–83. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2023-7-78-83

Received: 17.11.2023

Введение

Интегральное моделирование на сегодняшний день является стандартным методом оптимизации разработки нефтегазовых месторождений, когда речь идет об учете взаимовлияния объектов подземной и наземной инфраструктуры [1–4]. Особенно оно становится актуальным, когда моделирование включает экономическую оценку на перспективу разработки месторождений. При этом, как правило, основное внимание уделяется моделированию пласта, поскольку от качества прогноза добычи нефти зависит точность оценки доходной части экономики нефтяного месторождения.

Признавая важность интегрального моделирования для прогнозирования разработки месторождения на средне- и долгосрочную перспективу, следует отметить, что оно может применяться и для решения краткосрочных задач (до одного года). В качестве такой задачи в настоящей работе предлагается рассмотреть задачу прогнозирования изменения энергоэффективности нефтяного месторождения.

Проблема энергоэффективности в последние годы является одной из наиболее актуальных в нефтегазовой сфере, но не всегда решается комплексно. Так, например, при планировании программы энергосбережения механизированной добычи нефти, на долю которой приходится порядка 70 % всех энергозатрат месторождения, слабо учитывается влияние предлагаемых энергосберегающих технологий и мероприятий на скважине на энергоэффективность других скважин и объектов наземной инфраструктуры. С другой стороны, часто не принимаются во внимание изменения, влияющие на скважины, но напрямую не связанные со скважинным оборудованием и режимом работы скважин, такие как проведение геолого-технических мероприятий, изменение режимов работы объектов поверхностной инфраструктуры.

Под интегральной моделью энергоэффективности цифрового актива будем понимать разновидность цифровой интегральной модели — единой цифровой модели месторождения, предназначенной для расчета энергопотребления каждого объекта (скважины, объекты поверхностного обустройства), учитывающей взаимовлияние объектов друг на друга и ориентированной на оптимизацию энергопотребления. Специфическими особенностями такой модели являются:

- приоритет энергоэффективности в качестве критерия мониторинга и оптимизации интегральной модели;
- сравнительно небольшой (от одного месяца до полугода) горизонт

прогнозирования, предполагающий, что инфраструктура месторождения за период моделирования не изменится;

- акцент на моделировании механизированной добычи. Как основного потребителя электроэнергии месторождения.

В общем случае интегральная модель энергоэффективности цифрового актива включает в себя пять основных элементов: пласт, механизированную добычу, систему сбора, систему подготовки и систему поддержания пластового давления (ППД). И связывающий их воедино алгоритм. Элементы интегральной модели представлены «цифровыми двойниками» — математическими моделями, которые способны адаптироваться на промысловые данные и проводить прогнозные расчеты на заданном горизонте времени.

В настоящей работе для моделирования механизированной добычи используются разработанные ранее с участием авторов «цифровые двойники» добывающих скважин, оборудованных установками электроцентробежных (УЭЦН) и скважинных штанговых насосов (ШСНУ) с детализацией энергозатрат по узлам оборудования [5]. Для описания системы сбора, транспортировки и подготовки скважинной продукции создаются графы, моделирующие конфигурацию наземных трубопроводов с расположенными в их вершинах технологическими объектами (замерные установки, водозаборные скважины, насосы, теплообменники и т.д.), в которых рассчитываются перепады давлений и температур. Пласт описывается сравнительно простыми моделями, основанными на методе материального баланса и аппроксимации исторических данных, которые позволяют прогнозировать изменение пластового давления и обводненностей для ячеек заводнения и добывающих скважин.

Связывающий алгоритм с заданным временным шагом (обычно выбирается 1 месяц) последовательно запускает на расчет «цифровые двойники» и обеспечивает обмен данными между ними. Основными объектами исследования в силу специфики задачи являются насосные установки для добычи нефти, насосы внутренней перекачки и системы ППД, компрессоры, теплообменники: все потребители электроэнергии на месторождении представлены «цифровыми двойниками», позволяющими рассчитывать энергозатраты.

Целью настоящей работы является подтверждение применимости интегральной модели энергоэффективности к реальному месторождению и оценка влияния сценарных условий на изменение его энергетических показателей.

В качестве объекта для моделирования, на примере которого строилась интегральная

модель энергоэффективности, было выбрано одно из месторождений Башкирии, которое является в достаточной степени автономным (объект системы подготовки обслуживает только добывающие скважины данного месторождения) и многие годы разрабатывается в режиме заводнения (добывающий фонд представлен УЭЦН и УСН, а вода для закачки в продуктивные пласты месторождения поступает из системы подготовки после отделения ее от нефти и от водозаборных скважин).

Для анализа влияния мероприятий, проводимых на механизированном фонде скважин, на энергоэффективность месторождения было рассмотрено несколько сценариев:

- базовый сценарий: режимы работы добывающих, нагнетательных и водозаборных скважин, объектов подготовки и ППД в течение периода расчета не изменяются и соответствуют параметрам стартового периода;
- оптимизация режима работы скважины: в начале каждого нового расчетного месяца на всех скважинах производится изменение частоты тока УЭЦН или числа качаний ШСНУ, исходя из критерия достижения технологического потенциала или минимального удельного расхода электроэнергии (УРЭ);
- отключение высокообводненных скважин: в начале каждого нового расчетного месяца происходит остановка скважин механизированного фонда с высокой обводненностью.

В последующих разделах приводится более подробное описание «цифровых двойников» для каждого элемента цифрового актива, презентация связывающего алгоритма и результаты расчетов по приведенным выше сценариям.

Цифровые двойники составляющих интегральной модели цифрового актива и связывающий их алгоритм

Несмотря на то, что элементы цифрового актива (пласт, механизированная добыча, система сбора, подготовки и ППД) влияют друг на друга, это влияние не всегда является прямым. Так, например, пласт оказывает непосредственное влияние только на процессы механизированной добычи (через пластовое давление и обводненность скважин) и систему ППД (пластовое давление). Влияние пласта на другие элементы осуществляется опосредованно. Взаимодействие элементов цифрового актива может быть сведено к последовательному бинарному влиянию так, как это показано на рисунке 1.

Исходя из этого можно сформулировать понятия цифровых двойников каждого элемента цифрового актива.



Рис. 1. Упрощенная схема взаимодействия элементов цифрового актива

Fig. 1. Simplified interaction scheme of digital asset elements

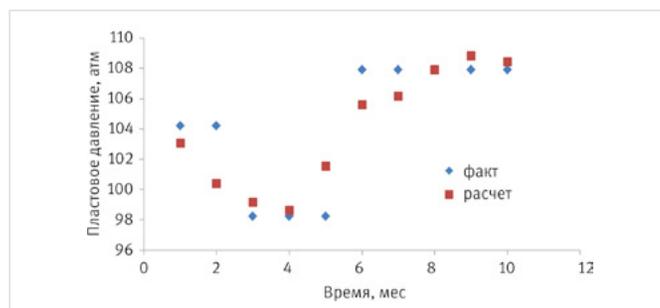


Рис. 2. Сравнение фактического и расчетного пластового давления по одной из ячеек заводнения

Fig. 2. Actual and calculated reservoir pressure comparison for one of the flooding cells

Цифровая модель пласта — модель пласта, которая на основе динамических данных о добыче (дебиты воды и нефти) и зачке (приемистость на нагнетательных скважинах) на месторождении позволяет рассчитывать пластовое давление и обводненность на добывающих скважинах.

Основные принципы построения модели пласта:

- пластовое давление в ячейках заводнения определяется с помощью метода материального баланса (рис. 2);
- обводненность вычисляется на основе балансовой модели (экстраполяция истории изменения накопленной добычи нефти от водонефтяного фактора).

Цифровая модель механизированной добычи нефти — объединенная модель группы скважин, которая позволяет на основе известных значений параметров пласта (пластовые давления и обводненности) и системы сбора (линейные давления) рассчитывать дебиты жидкости и забойные давления и определять расход газожидкостной смеси и обводненность нефти на групповых замерных установках (ГЗУ) для учета в трубопроводной системе.

Основные принципы моделирования механизированной добычи:

- фактические и прогнозные параметры технологического режима работы нефтяной скважины с УЭЦН и ШСНУ

определяются с помощью «цифрового двойника» [5-7];

- для насосного оборудования проводится детализация энергозатрат по узлам.

Цифровая модель системы сбора скважинной продукции — объединенная модель связанных трубопроводов, предназначенная для определения линейного давления на ГЗУ для добывающих скважин в зависимости от расхода газожидкостной смеси и обводненности продукции этих скважин.

Основные принципы моделирования системы сбора:

- система сбора представляет собой ориентированный граф в виде дерева с корнем, который является входной точкой

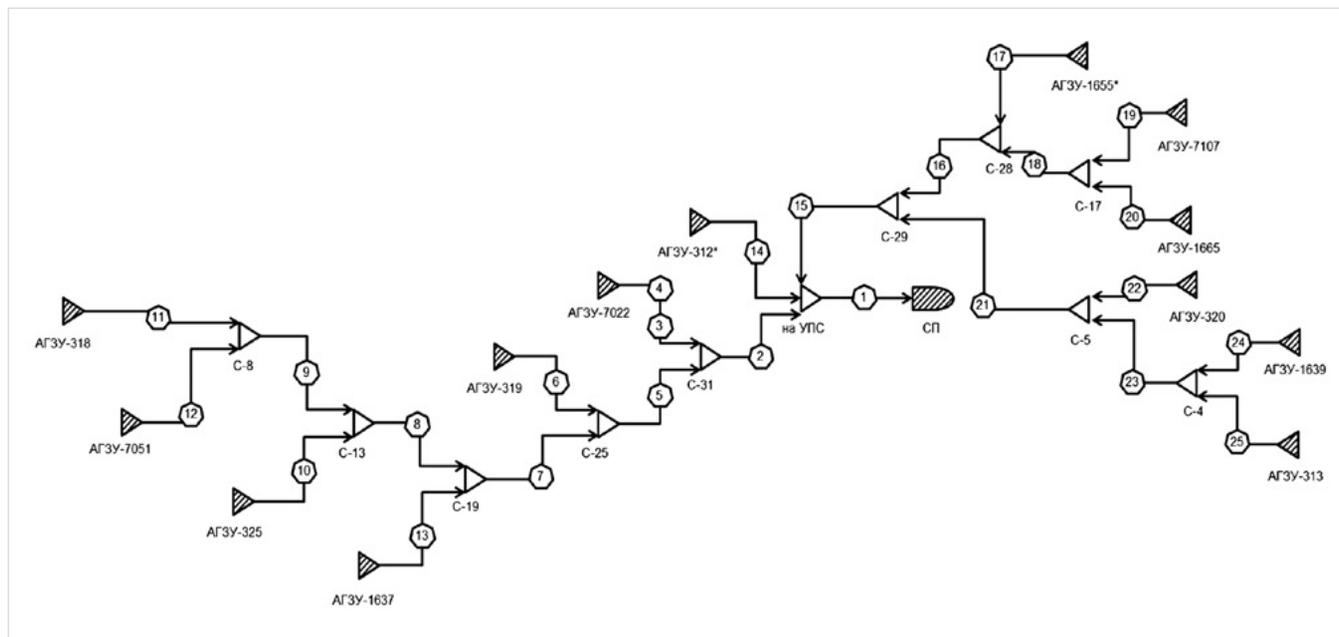


Рис. 3. Схема нефтесбора
Fig. 3. In-field flow line scheme

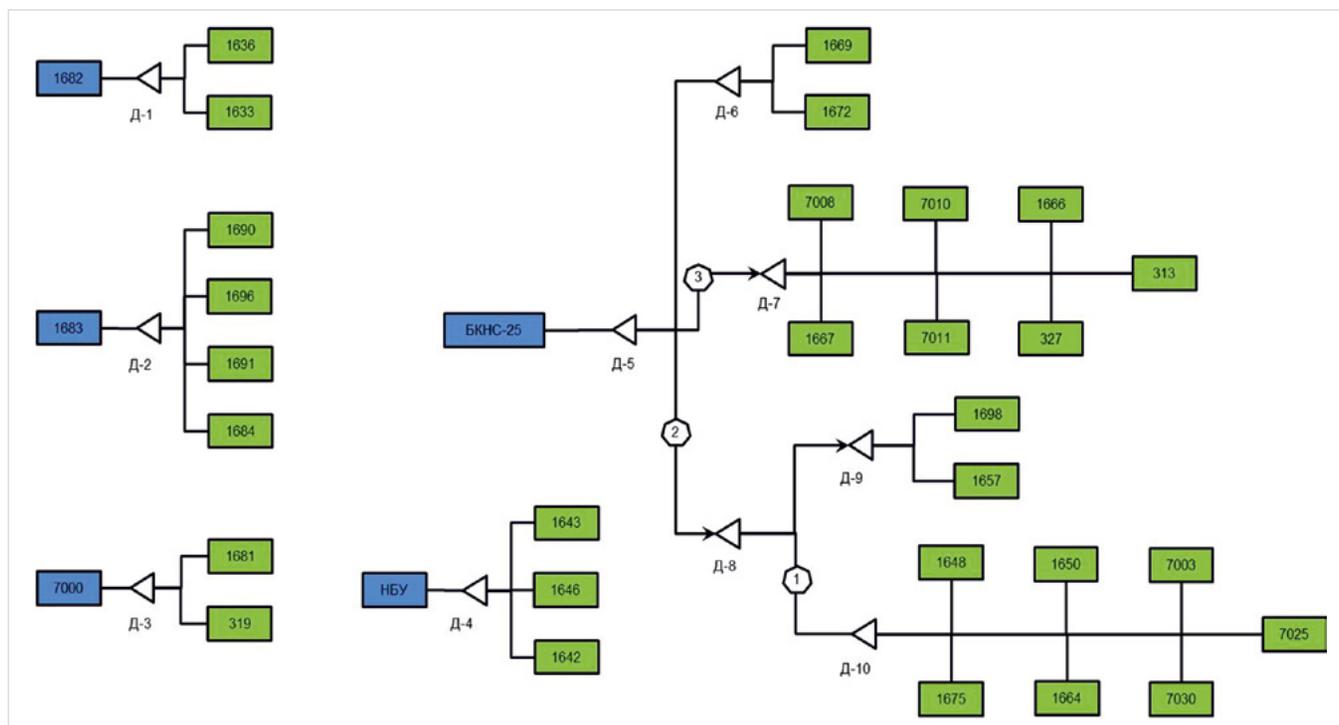


Рис. 4. Схема системы РПД
Fig. 4. The reservoir pressure maintenance system scheme

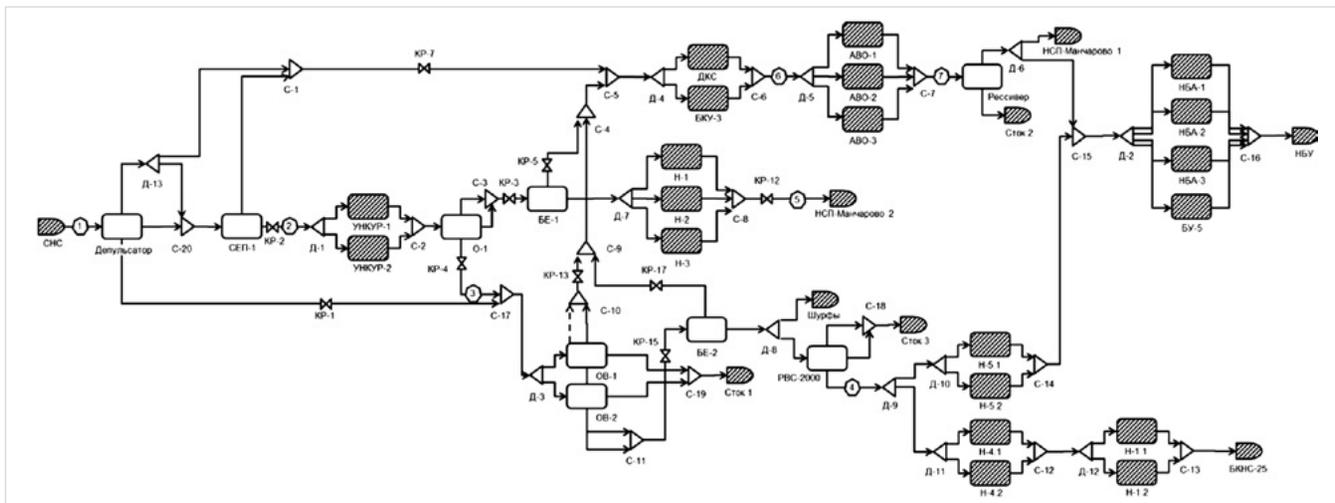


Рис. 5. Схема системы подготовки скважинной продукции
Fig. 5. Production field processing system scheme

в систему, и листьями, которые соответствуют ГЗУ;

- расчет производится при условии, что поток газожидкостной смеси движется всегда по направлению от ГЗУ к пункту подготовки нефти, при этом на входе в него задаются давление и температура газожидкостной смеси, а на ГЗУ задаются массовый расход углеводородной смеси и объемный расход воды, а также компонентный состав углеводородной смеси;
- для моделирования фазовых превращений в системе нефть-газ на элементарных участках труб используется приближение нелетучей нефти без учета массообмена, а в точках соединения участков труб и точках ветвления дерева — композиционная модель;
- для моделирования перепада давлений в трубе используется приближение Беггса-Брилла, а для расчета изменения температуры — корреляция Алвеса [8]. При расчете равновесного состояния системы нефть-газ используется уравнение Соаве-Ридлиха-Квонга [9].

Применительно к моделируемому месторождению система нефтесбора включает 13 ГЗУ, работающих на 59 скважин, 25 трубопроводов и 11 точек ветвления (рис. 3).

Цифровая модель системы поддержания пластового давления — объединенная модель водозаборных скважин и связанных трубопроводов, предназначенная для определения приемистости нагнетательных скважин.

Основные принципы моделирования системы ППД:

- система ППД представляет собой несвязанный ориентированный граф в виде деревьев, корнями которых являются водостойники (водозаборные скважины, насосы бустерной установки (НБУ) и блочной кустовой насосной станции (БКНС)), и листьями, которые соответствуют ячейкам заводнения;
- для моделирования водозаборных скважин применяется модель «цифрового двойника» скважины с УЭЦН;
- для моделирования перепада давлений в трубопроводах используется приближение Беггса-Брилла, а для расчета изменения температуры — корреляция Алвеса;
- распределение потоков воды на делителях и гребенках фиксируется для базового месяца расчета с учетом известных

приемистостей нагнетательных скважин.

Для моделируемого месторождения система ППД включает 3 водозаборные скважины, 2 источника сброса воды в системе подготовки (НБУ и БКНС), 3 трубопровода, 10 делителей-гребенок и 29 нагнетательных скважин, которые работают на 14 ячеек заводнения (рис. 4).

Цифровая модель системы подготовки скважинной продукции — объединенная модель связанных объектов (насосы, сепараторы, трубопроводы и проч.), которая на основе известных расходов углеводородной смеси и воды на входе рассчитывает расход воды в системе ППД и параметры энергоэффективности входящих в нее источников энергопотребления.

Основные принципы моделирования системы подготовки:

- система подготовки представляет собой связанный ориентированный граф, который содержит один источник (он же сток для системы сбора) и несколько стоков, из которых только два (БКНС и НБУ) являются источниками для системы ППД;
- для моделирования каждого типа объекта (насос, теплообменник, отстойник, сепаратор, трубопровод, клапан, сумматор, делитель) используется собственный «цифровой двойник»;
- энергопотребление рассчитывается только для насосов и теплообменников.

Для моделируемого месторождения система подготовки в общей сложности содержит 13 насосов, 7 теплообменников, 5 отстойников, 4 сепаратора, 7 трубопроводов, 10 клапанов, 20 точек ветвления-сумматоров и 12 делителей потока (рис. 5).

Связывающий цифровые двойники алгоритм функционирования интегральной модели цифрового актива выглядит следующим образом:

1. Для базового месяца, с которого стартует расчет, происходит адаптация параметров «цифровых двойников» на фактические данные. Для механизированных скважин она заключается в определении поправочных коэффициентов для расчета напора и КПД электроцентробежных насосов и коэффициентов утечек в клапанной паре и коэффициента растяжения штанговой колонны для ШСНУ таким образом, чтобы расчетные дебит жидкости и потребляемая мощность совпали

с замерными значениями. Адаптация цифровой модели системы сбора проводится с помощью варьирования местного сопротивления путем изменения эффективного внутреннего диаметра труб для обеспечения согласования линейных давлений на ГЗУ и давления и температуры на входе в пункт подготовки нефти. Остальные объекты: теплообменники, сепараторы, отстойники и т.д. Адаптировались путем варьирования их характеристик (перепады давлений, температур, КПД) таким образом, чтобы обеспечить согласование с замерными параметрами для базового месяца. После адаптации параметров «цифровых двойников» на замерные данные базового месяца они фиксировались и в ходе прогнозных расчетов уже не изменялись.

2. Осуществляется последовательный пересчет цифровых моделей пласта, механизированной добычи, системы сбора, системы подготовки и системы ППД на данных базового месяца. Рассчитывается энергопотребление объектов цифрового актива.
3. По результатам расчета формируется технологический режим первого прогнозного месяца, который также участвует в формировании истории изменения параметров для модели пласта, после чего повторяются действия из п. 2.
4. Расчет продолжается до тех пор, пока не будет достигнут целевой расчетный месяц.

Примеры расчетов с помощью интегральной модели

Для примера функционирования цифровой модели рассмотрим базовый сценарий, когда считается, что режимы работы добывающих, нагнетательных и водозаборных скважин, объектов подготовки и ППД в течение периода расчета не меняются и соответствуют параметрам базового месяца. В качестве базового месяца здесь выбран июнь 2022 г., горизонт прогнозирования — 5 месяцев, шаг расчета — один месяц. Параметры пласта изменяются в соответствии с историческими трендами и расчетными значениями добычи и закачки.

На рисунке 6 представлено изменение энергопотребления за месяц и УРЭ по одной из скважин механизированного фонда

и всему механизированному фонду в целом. Из графиков видно, что значения энергопотребления и УРЭ изменяются немонотонно. Это связано с тем, что добыча и закачка для ячеек заводнения не согласованы между собой в настоящем и прошлом (т.е. пластовые давления и обводненности по каждой ячейке заводнения имеют свои тренды), что ведет к изменению параметров всей системы, даже если зафиксировать параметры подземного и наземного оборудования.

Для сравнения на рисунках 7 и 8 показаны расчеты для двух других сценариев: оптимизация механизированного

фонда и отключение высокообводненных скважин для механизированного фонда и системы ППД соответственно.

Как следует из представленных графиков, оптимизация добычи приводит к росту энергопотребления и УРЭ для скважин механизированного фонда (дополнительная добыча на пределе технологического потенциала, как правило, связана с непропорциональным увеличением энергозатрат), но при этом УРЭ для скважин ППД ниже, чем для базового сценария. Отключение высокообводненных скважин, наоборот, приводит к снижению энергопотребления механизированного фонда (5 скважин

из 59 «выпадают» из расчета), но в данном случае УРЭ оказывается выше, чем для базового сценария. Для ППД базовый сценарий и сценарий с отключением высокообводненных скважин дают примерно одинаковые результаты по энергопотреблению и УРЭ.

Итоги

Таким образом, на примере одного из нефтяных месторождений Башкирии разработана интегральная модель энергоэффективности, объединяющая цифровые модели пласта, механизированной добычи нефти, систем нефтесбора, подготовки скважинной продукции

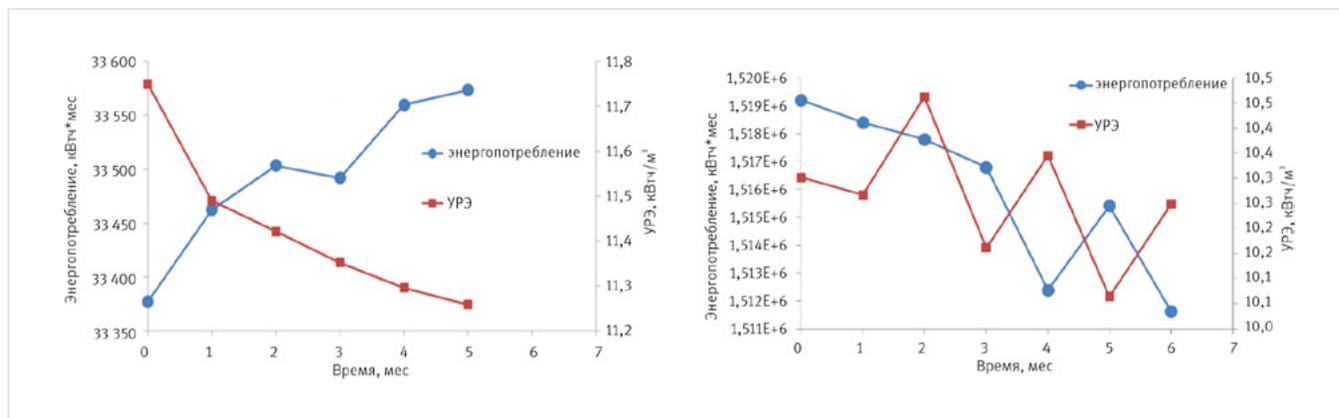


Рис. 6. Изменение энергопотребления и УРЭ по одиночной скважине (слева) и всему механизированному фонду скважин (справа) для базового сценария

Fig. 6. Energy consumption and specific energy consumption (SEC) changes for a single well (on the left); for the entire artificial lift well stocks (on the right) for basic scenario

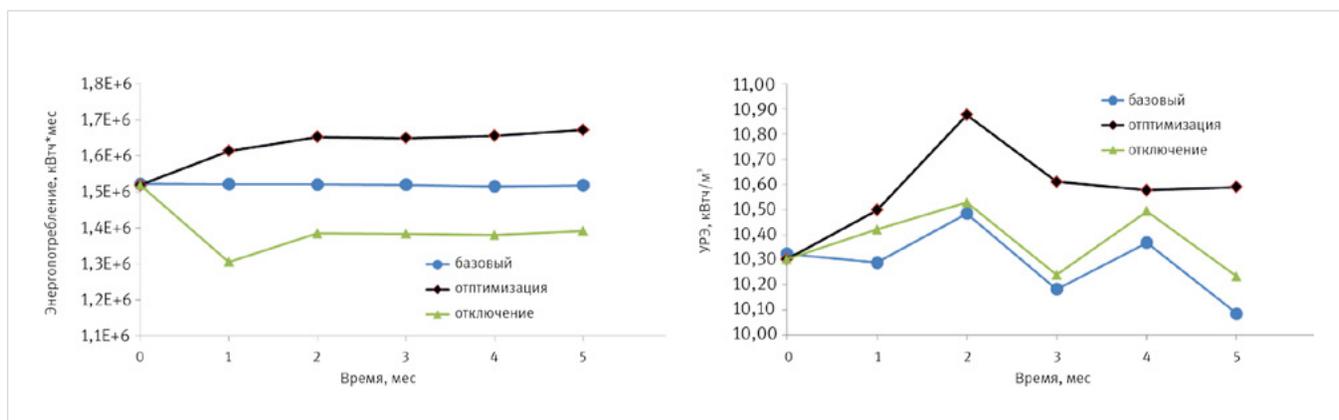


Рис. 7. Изменение энергопотребления (слева) и УРЭ (справа) по механизированному фонду скважин для различных сценариев

Fig. 7. Energy consumption (on the left) and SEC (on the right) changes for the mechanized well stock for various scenarios

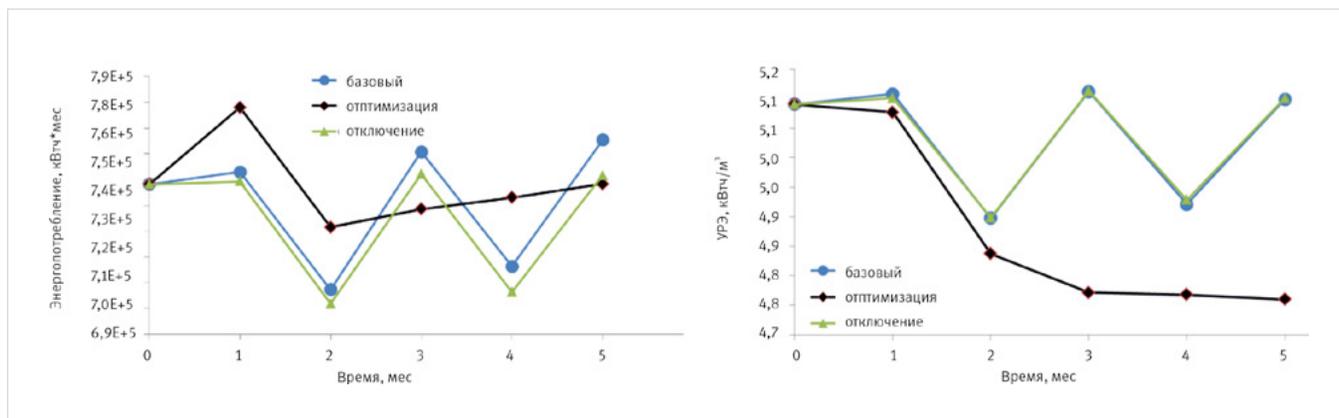


Рис. 8. Изменение энергопотребления (слева) и УРЭ (справа) по системе ППД для различных сценариев

Fig. 8. Energy consumption (on the left) and SEC (on the right) changes for the oil processing and pumping system for various scenarios

и поддержания пластового давления. Интегральная модель после адаптации на фактические данные позволяет проводить расчет изменения энергоэффективности всех потребителей электроэнергии на цифровом месторождении при сохранении текущих технологических параметров и сценарных условий.

Выводы

Перспективы развития модели энергосбережения цифрового актива видятся в решении следующих задач:

- усложнение «цифровых двойников» объектов модели и ее отдельных элементов;
- расширение перечня различных сценариев (оптимизация режимов работы наземного оборудования, отключение или ввод в эксплуатацию новых скважин или оборудования) и критериев для оптимизации;
- автоматическая оптимизация управляющих параметров объектов интегрального месторождения для достижения критериев энергоэффективности;
- адаптация в промысловых условиях, которая позволит оценить точность прогнозирования интегральной модели.

Литература

1. Волков С.В. Повышение эффективности

нефтегазодобычи на основе интегрированных операций // Нефть. Газ. Новации. 2016. № 8. С. 15–17.

2. Тихомиров Л.И., Земцов С.А., Волков С.В., Мещеряков М.А., Волчков С.В. Интеллектуальное месторождение. Комплексный подход к оперативному управлению предприятием нефтегазодобывающей отрасли на базе цифровых инструментов, с использованием методов машинного обучения и искусственного интеллекта // Научный журнал Российского газового общества. 2019. № 3–4. С. 21–26.
3. Власов А.И., Можчиля А.Ф. Обзор технологий: от цифрового к интеллектуальному месторождению // ПРОНЕФТЬ. 2018. № 3. С. 68–74.
4. Филиппов Е.В., Чумаков Г.Н., Пономарева И.Н., Мартюшев Д.А. Применение интегрированного моделирования в нефтегазовой отрасли // Недропользование. 2020. Т. 20. № 4. С. 386–400.
5. Пашали А.А., Колонских А.В., Халфин Р.С., Сильнов Д.В., Топольников А.С., Латыпов Б.М., Уразаков К.Р., Катермин А.В., Палагута А.А., Еникеев Р.М. Цифровой двойник скважины как

инструмент цифровизации вывода скважины на режим в ПАО АНК «Башнефть» // Нефтяное хозяйство. 2021. Т. 3. С. 80–84.

6. Пашали А.А., Сильнов Д.В., Топольников А.С., Латыпов Б.М., Еникеев Р.М., Шубин С.С. Вывод на режим скважин, эксплуатируемых установками электроцентробежных и скважинных штанговых насосов, с применением методов машинного обучения и цифровых двойников // Нефтяное хозяйство. 2021. № 7. С. 112–117.
7. Архипов Д.С., Латыпов Б.М., Сильнов Д.С., Еникеев Р.М., Пензин А.В., Валиахметов Л.В. Пути повышения энергоэффективности установок электроцентробежных насосов добычи нефти с применением цифровых двойников // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19. № 1. С. 42–50.
8. Брилл Дж.П., Мукерджи Х. Многофазный поток в скважинах. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. 384 с.
9. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие. Ленинград: Химия, 1982. 592 с.

ENGLISH

Results

Thus, on the example of one of the oil fields of Bashkiriya, an integrated energy efficiency model was developed, combining digital models of formation, mechanized oil extraction, oil recovery systems, well production preparation and maintenance of reservoir pressure. The integrated model, after adapting to the actual data, makes it possible to calculate the change in the energy efficiency of all consumers of electricity in a digital field while maintaining current technological parameters and scenario conditions.

Conclusions

Prospects of development of the model of energy saving of the digital

asset are seen in the following tasks:

- complexity of «digital doubles» of model objects and its individual elements;
- expansion of the list of different scenarios (optimization of ground equipment operation modes, disconnection or commissioning of new wells or equipment) and criteria for optimization;
- automatic optimization of control parameters of integrated field objects to achieve energy efficiency criteria;
- adaptation in fishing conditions, which will assess the accuracy of the projection of the integrated model.

References

1. Volkov S.V. Improving the efficiency of oil and gas production through integrated operations. Neft. Gas. Novacii, 2016, issue 8, P.15–17. (In Russ).
2. Tikhomirov L.I., Zemtsov S.A., Volkov S.V., Mescheriakov M.A., Volchokov S.V. The smart oilfield. An integrated approach to real-time enterprise management based on digital tools using machine learning and artificial intelligence methods. Scientific journal of the Russian gas society, 2019, issue 3–4, P. 21–26. (In Russ).
3. Vlasov A.I., Mozchhil A.F. Technology overview: from digital to intelligent field. PROneft, 2018, issue 3, P. 68–74. (In Russ).
4. Filippov E.V., Chumakov G.N., Ponomareva I.N., Martyshev D.A. Application of integrated modeling in the oil and gas industry. Nedropolzovanie, 2020, Vol. 20, issue 4. P. 386–400. (In Russ).
5. Pashali A.A., Kolonskikh A.V., Khalfin R.S., Silnov D.V., Topolnikov A.S., Latypov B.M., Urazakov K.R., Katermin A.V., Palaguta A.A., Enikeev R.M. A digital twin of well as a tool of digitalization of bringing the well on to stable production in “Bashneft” PJSC. Oil industry, 2021, issue 3, P. 80–84. (In Russ).
6. Arkhipov D.S., Latypov B.M., Silnov D.S., Enikeev R.M., Penzin A.V., Valiakhmetov L.V. Ways to improve the energy efficiency of electric submersible pump units for oil production using digital twins. Petroleum Engineering, 2021, Vol. 19, issue 1, P. 42–50. (In Russ).
7. Pashali A.A., Silnov D.V., Topolnikov A.S., Latypov B.M., Enikeev R.M., Shubin S.S. Bringing the oil wells equipped by electrical submersible and sucker rod pumps on to stable production based on complex approach using machine learning and digital twins. Oil industry, 2021, issue 7, P. 112–117. (In Russ).
8. Brill J.P., Mukherjee H. Multiphase flow in wells. Moscow-Izhevsk: Institute of Computer Research, 2006, 384 p. (In Russ).
9. Reed R., Prausnitz J., Sherwood T. Properties of gases and liquids. Reference manual. Leningrad: Himiya, 1982, 592 p. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Еникеев Руслан Марсельевич, менеджер по проектам инжиниринга и цифровой трансформации, департамент добычи нефти и газа, ПАО АНК «Башнефть», Уфа, Россия

Enikeev Ruslan Marselievich, manager on the projects of engineering and digital transformation, department of oil and gas production, ANK “Bashneft” PJSC, Ufa, Russia

Топольников Андрей Сергеевич, к.ф.-м.н., эксперт отдела цифровой трансформации комплексного управления активом, управление цифровой трансформации производственных процессов, ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия

Topolnikov Andrey Sergeevich, ph.d. of physico-mathematical sciences, expert of the field of digital transformation of complex asset management, department of digital transformation of production processes, “RN-BashNIPineft” LLC (“Rosneft” PJSC Group Company), Ufa, Russia

Для контактов: topolnikovas@bnipi.rosneft.ru

Corresponding author: topolnikovas@bnipi.rosneft.ru