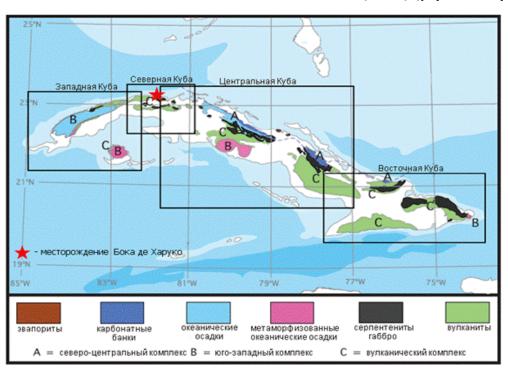


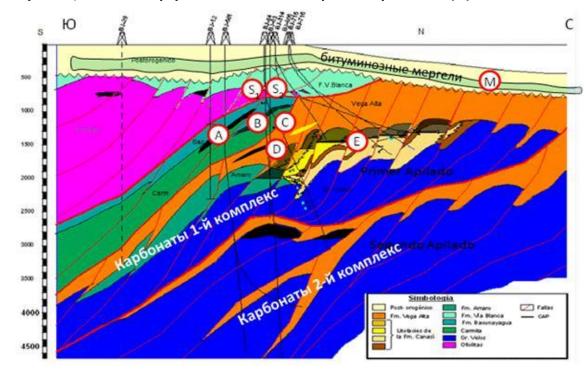
# НОВЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВЫХ МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

<u>ЮДИН Е.В.</u>, ЛУБНИН А.А., ЛУБНИНА Е.В.

ЗАВЬЯЛОВ И.Н., ЗАВЬЯЛОВА Н.А., НЕВМЕРЖИЦКИЙ Я.В.

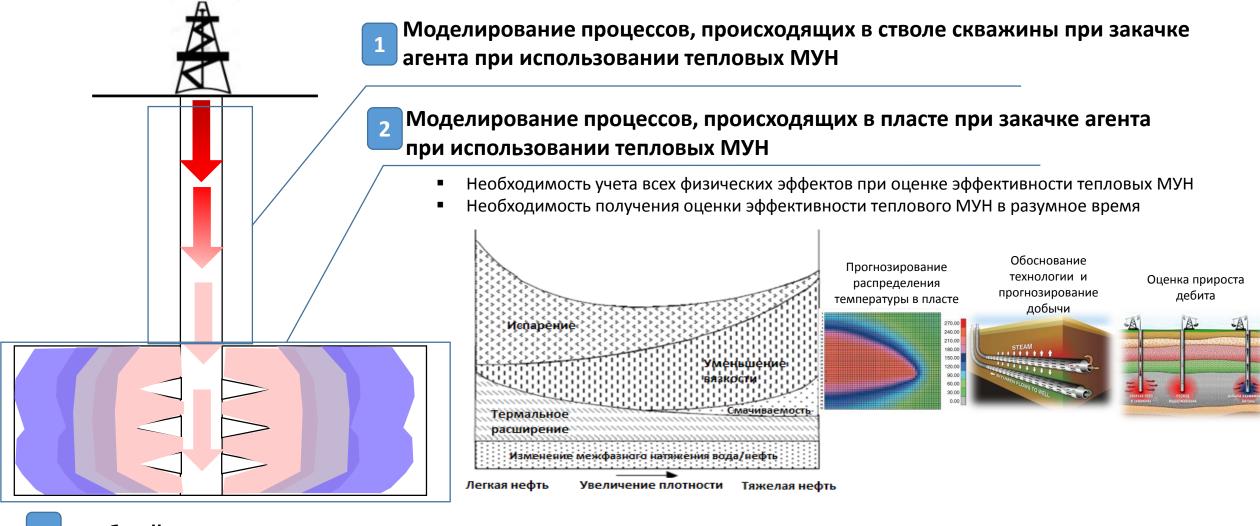
- В портфеле проектов АО «Зарубежнефть» есть проекты разработки месторождений высоковязкой нефти (\*). Идет активный поиск новых проектов высоковязкой нефти
- Развитие компетенций АО «Зарубежнефть» в области применения тепловых МУН. Отсутствие в компании регламентирующего документа по тепловым методам.
- Необходимость оперативного принятия решения при оценке эффективности применения тепловых МУН, что невозможно с помощью других существующих инструментов, например, 3D ГДМ.





#### (\*) SPE 176699, SPE 187683

## Постановка задачи



3 Удобный пре- и пост-процессинг, ориентация на инженерные расчеты

Рекомендуемые корреляции PVT и функциональные зависимости (вязкость, сжимаемость, теплоемкость, ОФП от температуры и т.д.)

Интуитивный интерфейс Описание основных параметров и пределов их изменений Описание основных моделей Сравнение и анализ результатов

## Цель

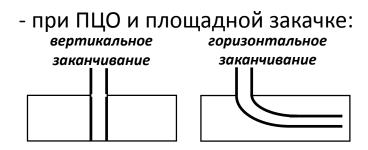
#### Оценка различных тепловых методов

- ✓ ПЦО скважины
- ✓ Парогравитационный дренаж (SAGD)
- ✓ Постоянная площадная закачка
- ✓ Спуск скважинного нагревателя

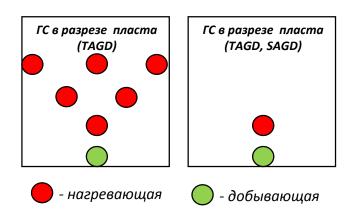
#### Учет физических эффектов

- ✓ фазовые переходы
- ✓ снижение вязкости
- ✓ смачиваемость
- ✓ термическое расширение
- ✓ изменение межфазного натяжение вода-нефть
- ✓ вязкопластичные свойства нефти
- ✓ гравитация и теплоперенос
- ✓ погрев прилегающих пород
- ✓ наличие трещин ГРП





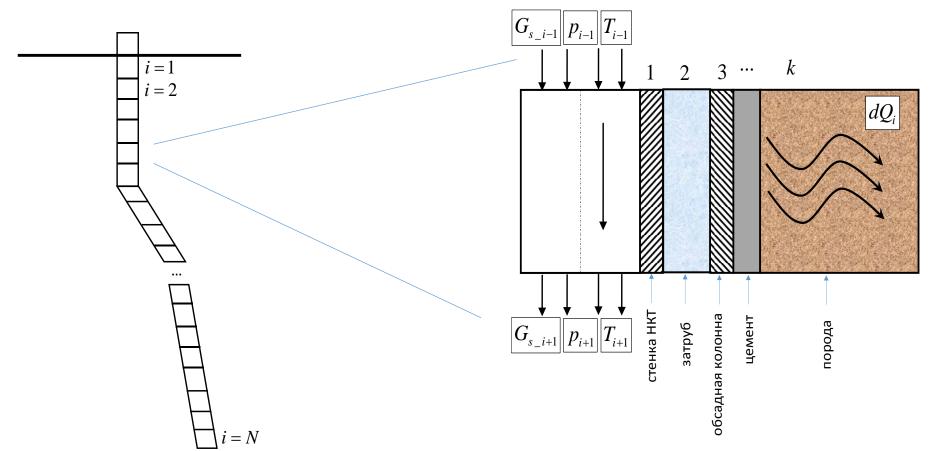
- при SAGD и спуске нагревателя:





- Быстрое Удобное
- Доступное

#### Схема расчета состояния теплоносителя по стволу скважины



#### Расчет теплопотерь:

- Из Термограмм
- Прямым расчетом с учетом фактической конструкции скважины

$$\rho_{k} c_{k} \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_{k} \frac{\partial U}{\partial r} \right)$$

#### Гидравлический расчет:

 Корреляция Beggs&Brill с учетом фактической сухости пара

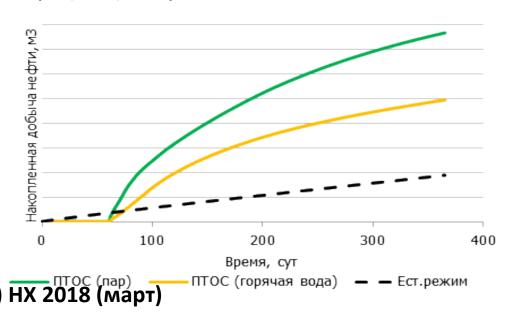
$$\frac{dP}{dL} = \rho_s g \sin \theta - \frac{f \rho_n v_m^2}{2D}$$

## Технологический режим паронагнетательной скважины: результаты

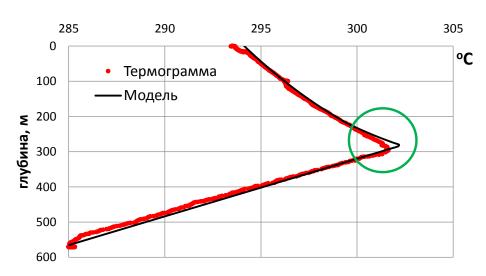
#### Разработанный модуль позволяет проводить

- Оценку забойного давления и состояния флюида на по данным на устье
- Интерпретацию ТермоГДИ
- Оценку сухости пара на выходе из парогенератора пример скважины Бока де Харуко

# Сравнение накопленной добычи при закачке пара (80%) и горячей воды



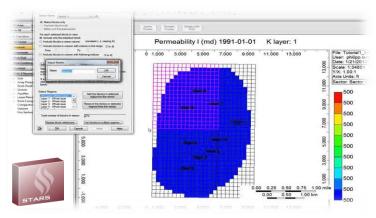
#### Адаптация термограммы



## Распределение сухости пара по стволу скважины



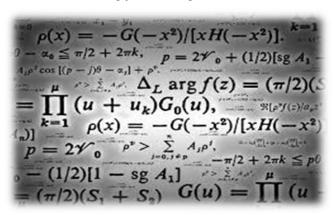
#### Полномасштабная 3D



#### Физ. эффекты:

- Снижение вязкости
- Смачиваемость
- Испарение
- Термическое расширение
- Изменение межфазного натяжения вода-нефть
- Вязкопластичные свойства нефти
- Длительный процесс подготовки модели и проведения расчетов
- Необходимость наличия навыков моделирования

#### Аналитика

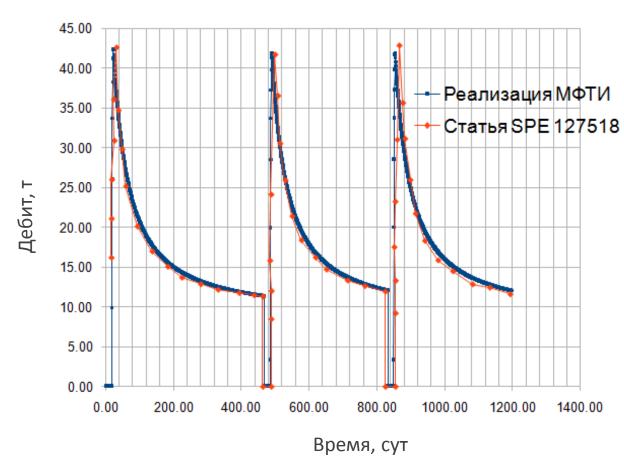


#### Физ. эффекты:

- Снижение вязкости
- Смачиваемость
- **У** Испарение
- Термическое расширение
- Изменение межфазного натяжения вода-нефть
- Вязкопластичные свойства нефти
- Быстрота в использовании
- Не учитываются большое количество физических эффектов
- Область применения ограничена (только однородная среда)

- Проанализировано более 70 наиболее цитируемых статей в области аналитических методов оценки эффективности тепловых МУН
- Выбраны наиболее универсальные для моделирования:
  - ПЦО
  - Постоянной площадной закачки
  - SAGD
  - Скважинного нагревателя
- Прототип: аналитические модели + технологический режим

# Сравнение реализации со статьей для горизонтальной ПЦО



## Задача 2: Численные модели

#### Баланс массы компонентов

$$\frac{\partial m_{H_2O}}{\partial t} - \nabla \cdot \left\{ k \frac{f_{H_2O}}{\mu_{H_2O}} \rho_{H_2O} \nabla p_{H_2O} + k \frac{f_G}{\mu_v} \rho_v \nabla p_v \right\} = Q_{H_2O}$$

$$\frac{\partial m_{LO}}{\partial t} - \nabla \cdot \left\{ k \frac{f_O}{\mu_{LO}} \rho_{LO} \nabla p_{LO} + k \frac{f_G}{\mu_{LG}} \rho_{LG} \nabla p_{LG} \right\} = Q_{LO}$$

$$\frac{\partial m_{HO}}{\partial t} - \nabla \cdot \left\{ k \frac{f_O}{\mu_{HO}} \rho_{HO} \nabla p_{HO} + k \frac{f_G}{\mu_{HG}} \rho_{HG} \nabla p_{HG} \right\} = Q_{HO}$$

#### Баланс энергии

$$\begin{split} \frac{\partial e}{\partial t} - \nabla \cdot \left\{ k \sum_{\alpha} \frac{f_{\alpha}}{\mu_{\alpha}} \rho_{\alpha} h_{\alpha} \nabla p_{\alpha} + \bar{\lambda} \nabla T \right\} &= Q_{e}, \\ \alpha &= H_{2}O, v, LO, LG, HO, HG \end{split}$$

#### Уравнение для давления

$$S \stackrel{def}{=} \sum_{\alpha} S_{\alpha} = 1$$
 
$$\delta S = \frac{\partial S}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} \delta t + \frac{\partial S}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial t} \delta t + \frac{\partial S}{\partial m_{o}} \frac{\partial m_{o}}{\partial t} \delta t + \frac{\partial S}{\partial m_{H_{2}O}} \frac{\partial m_{H_{2}O}}{\partial t} \delta t = 0$$

## С учетом испарения легких фракций

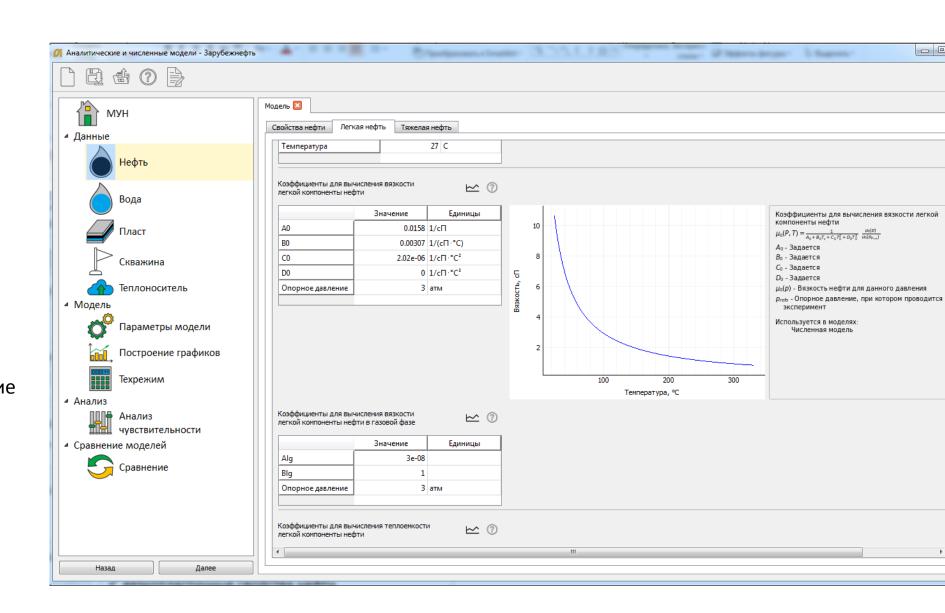
	газовая фаза	водная фаза	нефтяная фаза
вода	V	V	
легкая нефть	V		٧
тяжелая нефть	٧		٧

#### Замыкающие соотношения

Для компонент вязкость, плотность, ОФП зависят от  $m_{lpha}$ , p, e Теплоемкость, теплопроводностьи вязко-пластичные свойства среды зависят от T

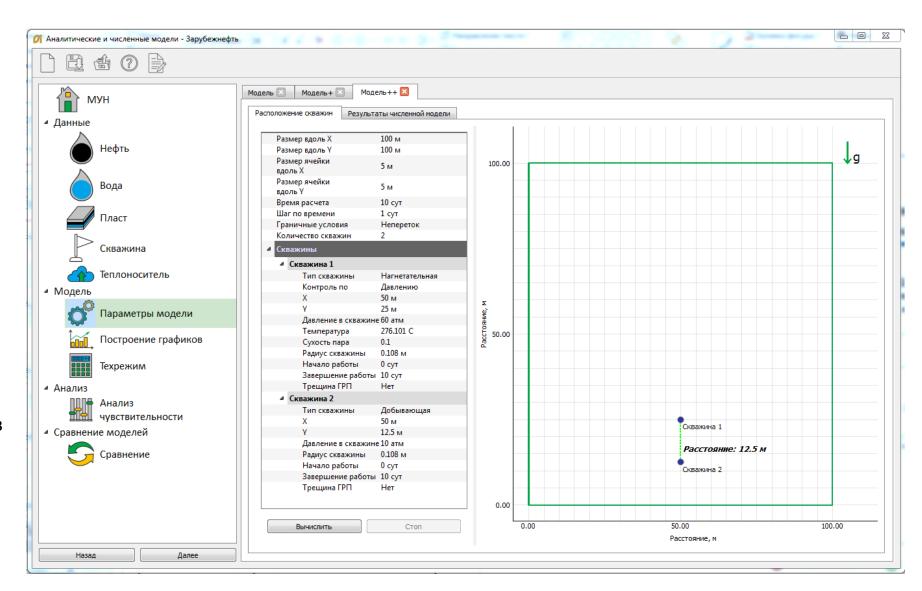
## Результаты реализации

- Реализация типовых МУН:
  - ПЦО
  - Постоянная закачка
  - SAGD
  - Скважинный нагреватель
- Описание всех методов воздействия:
  - Краткое
  - Подробное по справке
- Последовательное прохождение всех пунктов меню для исключения ошибки
- Расстановка наиболее популярных значений по умолчанию
- Ограничения на вводимые значения



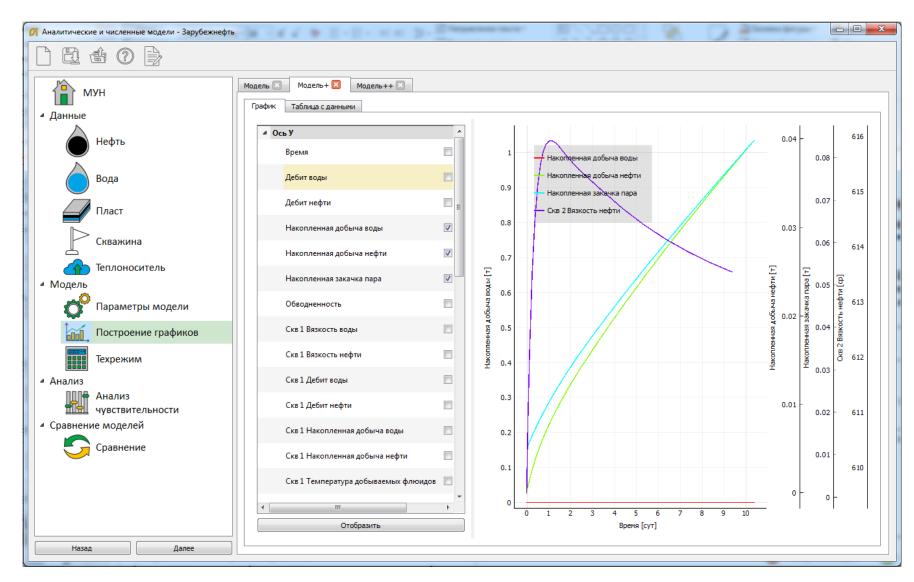
## Результаты реализации

- Описание-обзор наиболее часто встречающихся значений
- о Подсказки пользователю
- Специальная вкладка для технологического режима
- Расстановка скважин по умолчанию
- Возможность остановки расчетов и визуализации результатов до окончания расчета



## Результаты реализации

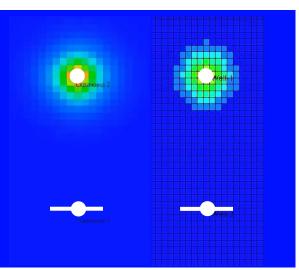
- Специальная возможность учесть технологический режим скважины
- Расширенные возможности для анализа моделей:
  - Построение графиков для скважин
  - Импорт и экспорт в Эксель
  - Анализ чувствительности моделей к используемым параметрам
  - Возможность сравнения моделей
- Сохранение результатов расчетов в виде отчета в \*.docx

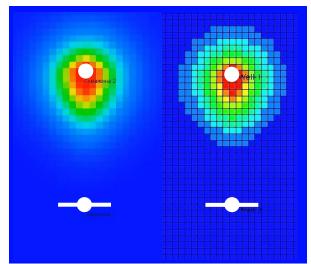


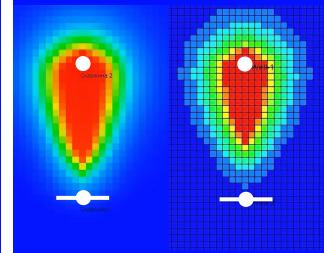
## Результаты тестов: Сравнение с CMG STARS

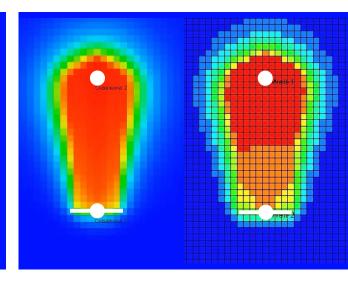
#### Постоянная закачка в области с трещиной

Поле температур







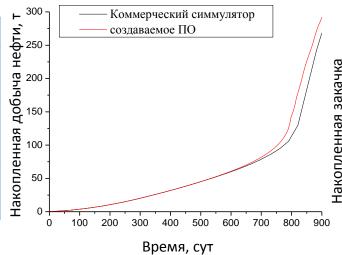


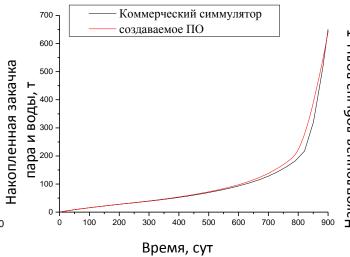
Скважина

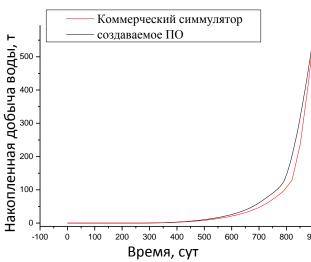
— Скважина с трещиной ГРП

#### Интегральные параметры

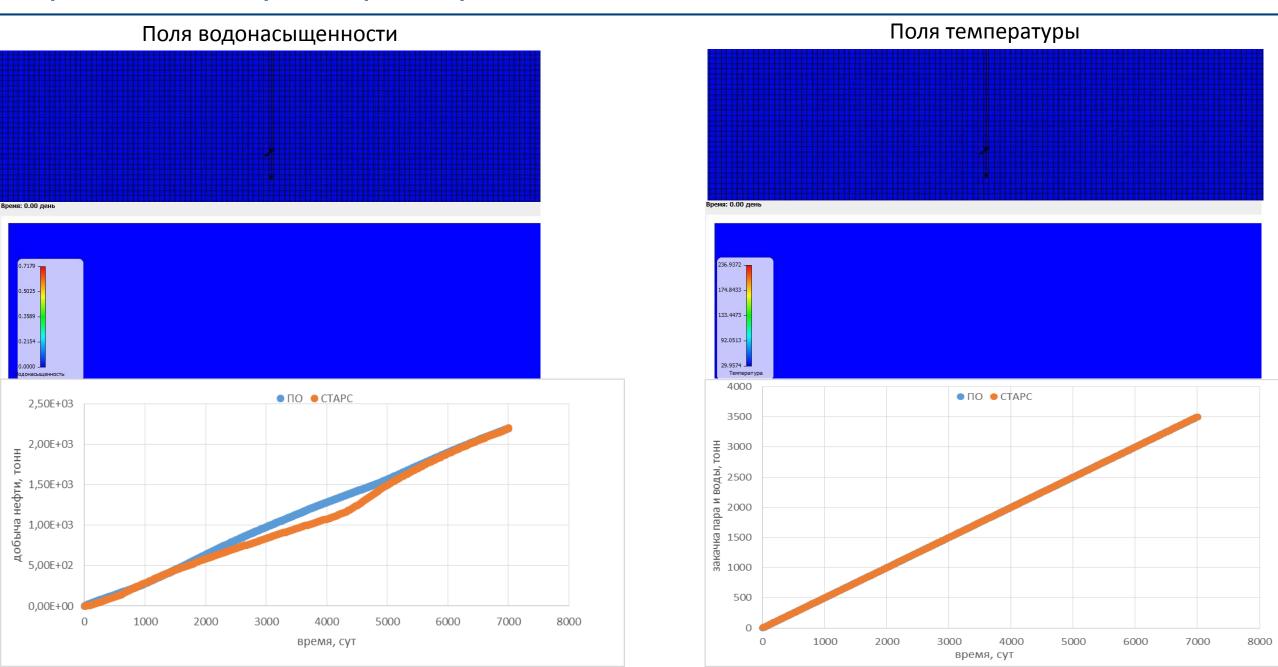
	ПО	Старс		
добыча	292.5 тонн	268.2 тонн		
нефти				
добыча	573.1 тонн	569 тонн		
воды				
закаченный	645.0 тонн	651 тонн		
пар				



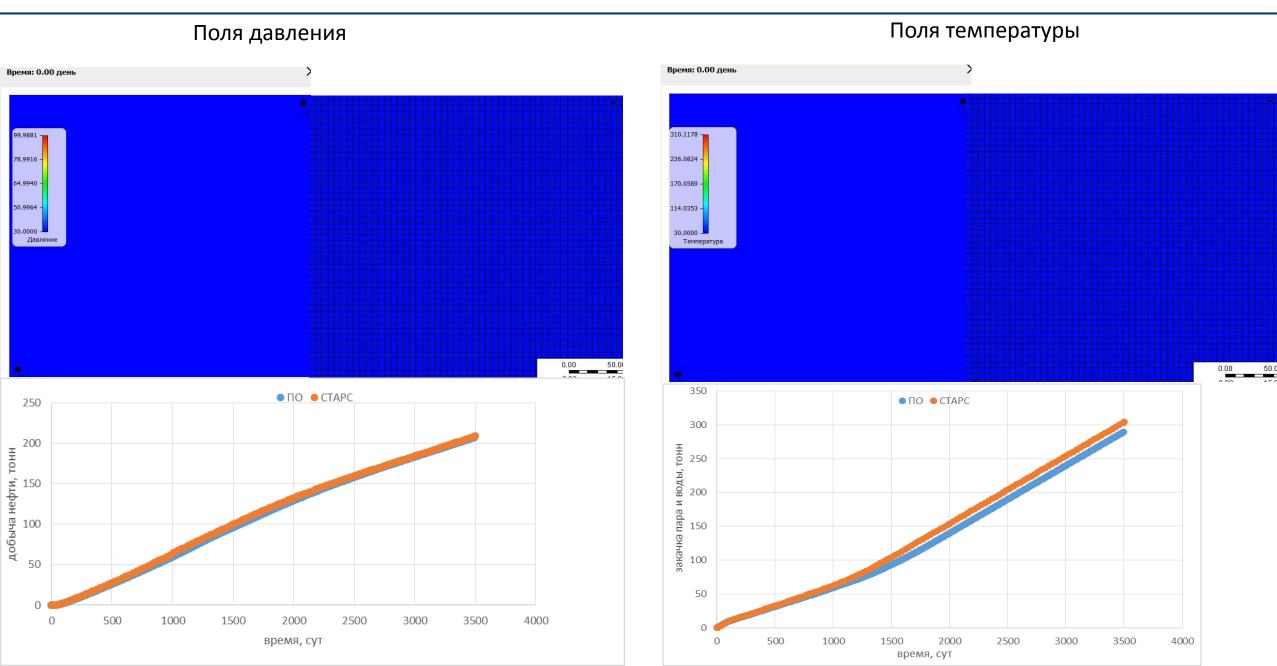




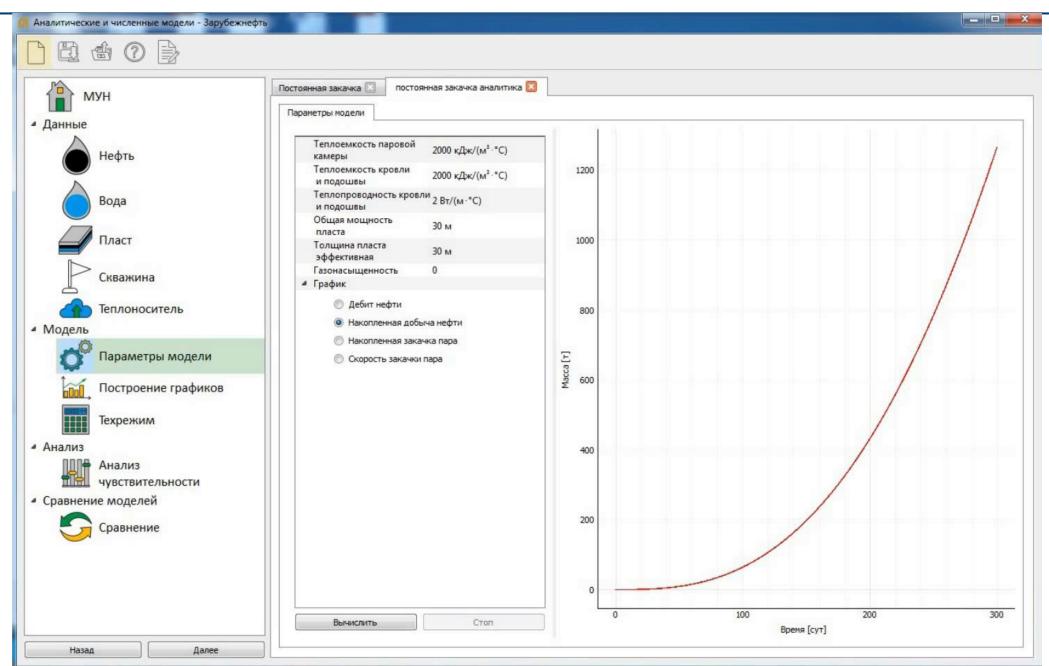
## Сравнение картин фильтрации технология SAGD



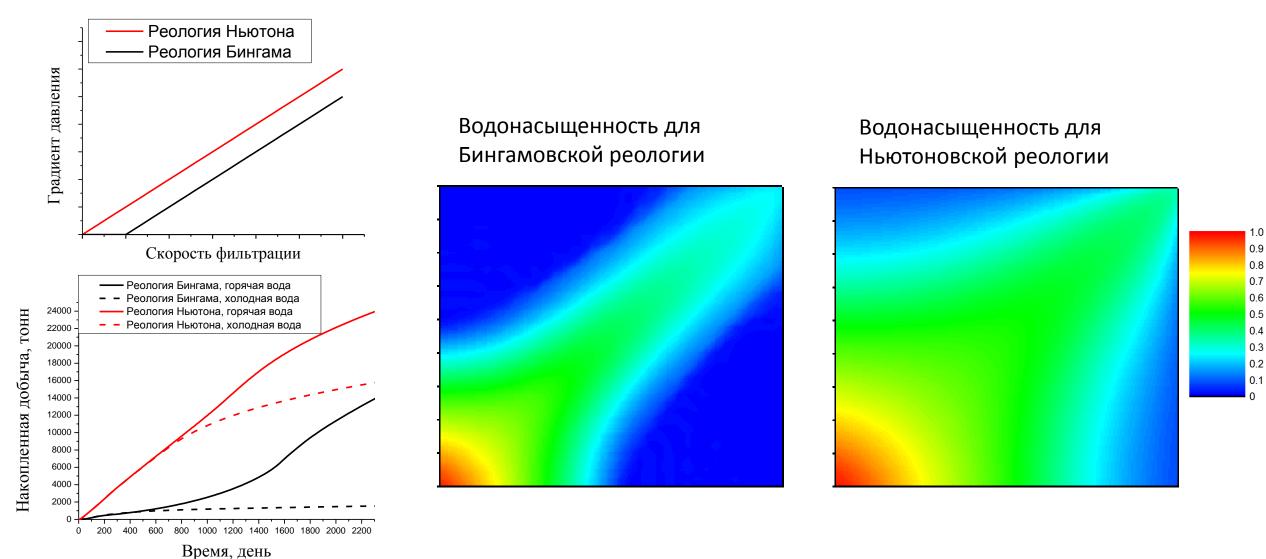
## Сравнение картин фильтрации площадная закачка пара



## Демонстрация работы программы

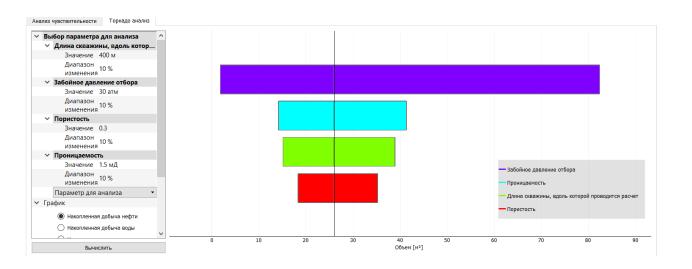


- Фильтрация не по закону Дарси характерна для высоковязких нефтей и для низкопроницаемых коллекторов
- Подтверждена многочисленными экспериментами по всему миру

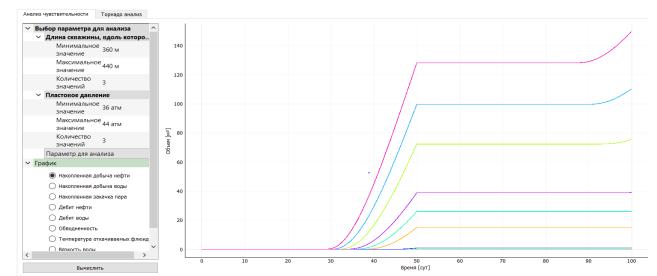


## Анализ результатов

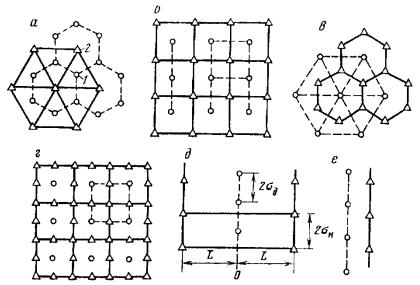
Tornado chart



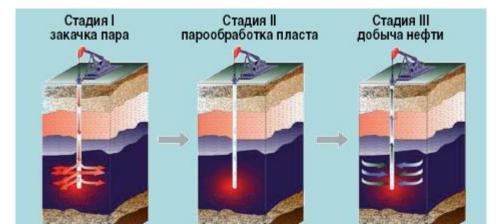
• Стандартный анализ



• Возможность быстро посмотреть эффективность разных схем разработки для месторождения



• Возможность оперативно определить схемы работы скважин



## Сравнение методов разработки

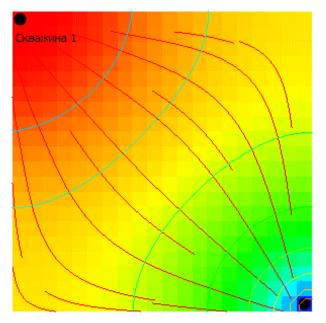
Сравнение двух методов воздействия:

- Постоянная закачка пара
- Пароциклическая обработка

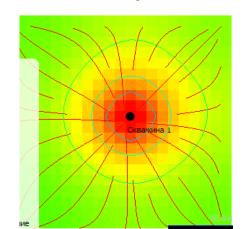


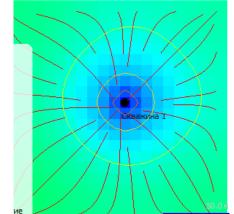
В данном случае лучше использовать постоянную закачку пара - т.к. шаг сетки скважин можно сделать больше

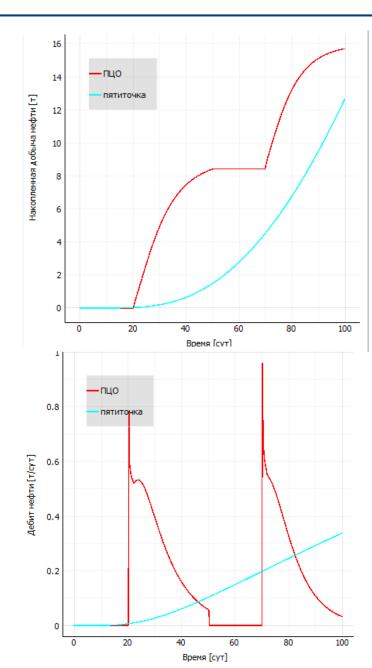
#### Постоянная закачка пара (5-ти точечная схема)



Пароциклическая обработка







### Практически значимые результаты

- Создана программа для оперативной оценки эффективности тепловых МУН
  - пароциклическая обработка для вертикальных и горизонтальных скважин,
  - постоянная закачка пара для всевозможных расстановок скважин,
  - парогравитационный дренаж,
  - скважинный нагреватель для вертикальных и горизонтальных скважин.
- Для организации корректных расчетов реализованы
  - модуль скважинных течений для оценки качества пара на забое
  - система подбора оптимальных моделей для ускорения принятия решений
- В программе реализованы и описаны следующие корреляции
  - корреляции и зависимости аналогичные используемым в ПО STARS CMG и ECLIPSE SCHLUMBERGER
  - корреляции IAWPS
  - Эмпирические корреляции для высоковязких нефтей

## Новые научные результаты

- Методы моделирования нелинейных законов фильтрации
- Получены результаты, показывающие влияние реологии нефти на разработку