



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**Санкт-Петербургский политехнический университет**

**Петра Великого**

Высшая школа теоретической механики и математической физики

## «Оптимизация работы оборудованных УЭЦН скважин, эксплуатирующихся в периодическом режиме»

**Выполнил:**

студент гр. 5040103/10401

**Петрушин М.А.**

**Руководитель:**

доцент ВШТМ и МФ, ФизМех, к.ф.-м.н.

**Юдин Е.В.**

**Направление подготовки:** 01.04.03 - Механика и математическое моделирование

**Профиль:** 01.04.03\_04 - Математическое моделирование процессов нефтегазодобычи

Санкт-Петербург  
2023

**Периодическая эксплуатация** - способ эксплуатации малодебитных скважин, основанный на чередовании периодов извлечения и накопления нефти на забое.

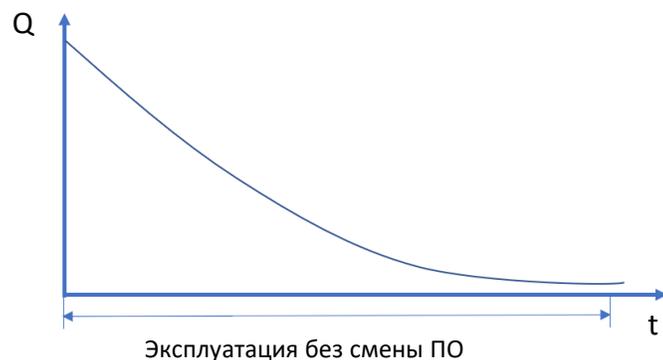
Доля периодического фонда в Компании >50%

К таким режимам относят:

- **ПКВ** (периодическое кратковременное включение), длительность циклов до 1 часа
- **АПВ** (автоматическое повторное включение), длительность циклов больше 1 часа

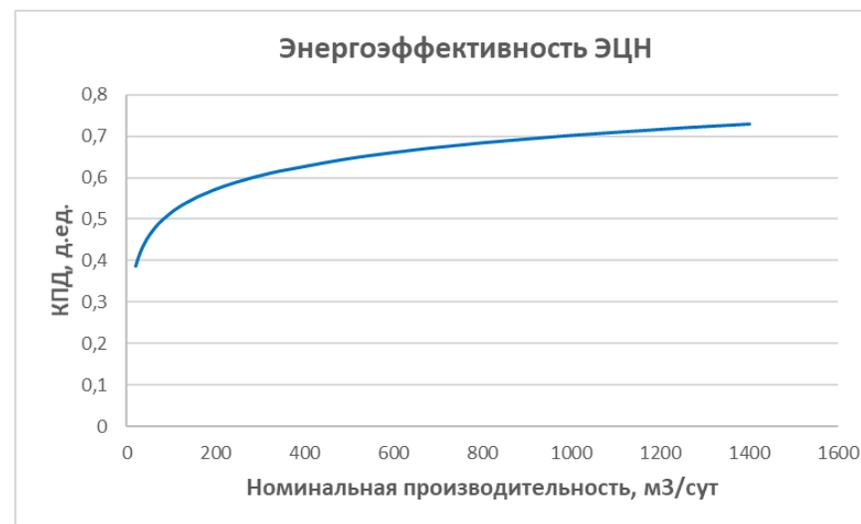
## Преимущества периодического режима:

✓ Отсутствие необходимости смены насоса даже при очень сильных снижениях дебита после выхода на установившийся режим



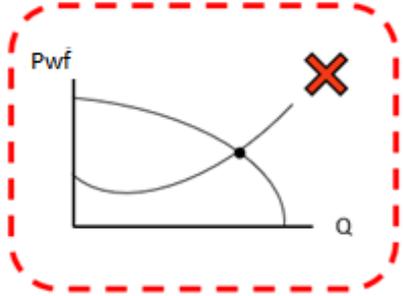
Повышение рентабельности эксплуатации фонда за счёт отсутствия необходимости проведения КРС при выходе на УР

✓ Рост энергоэффективности насосов с увеличением производительности

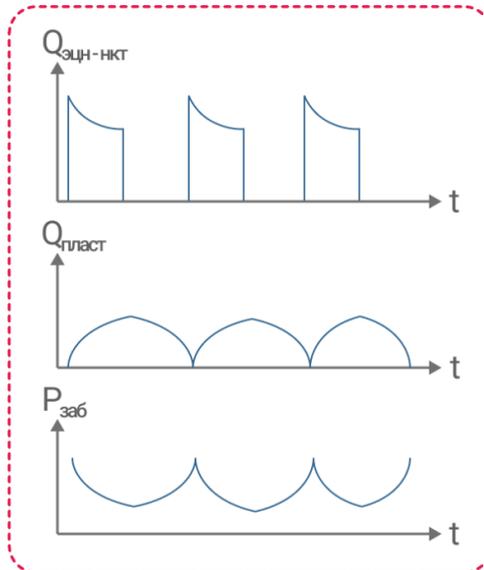


## Сложности моделирования периодического фонда

Классические подходы по моделированию не применимы для периодического фонда



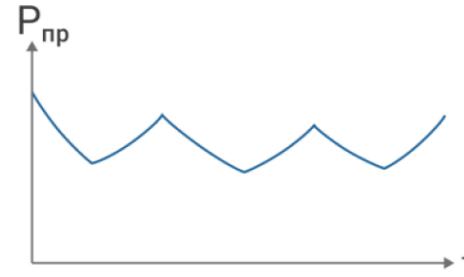
Т.к. динамика работы во время периодических процессов не подчиняется данным законам:



## Усложнение работы с потенциалом скважин

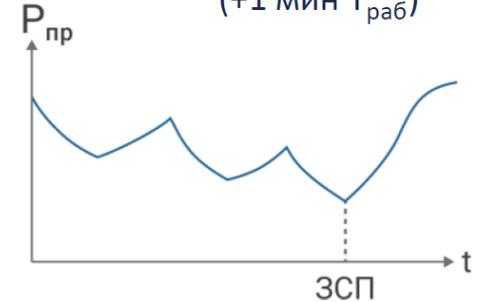
Высокие риски ВСП вследствие непрогнозируемого поведения показателей работы внутри цикла:

До оптимизации:

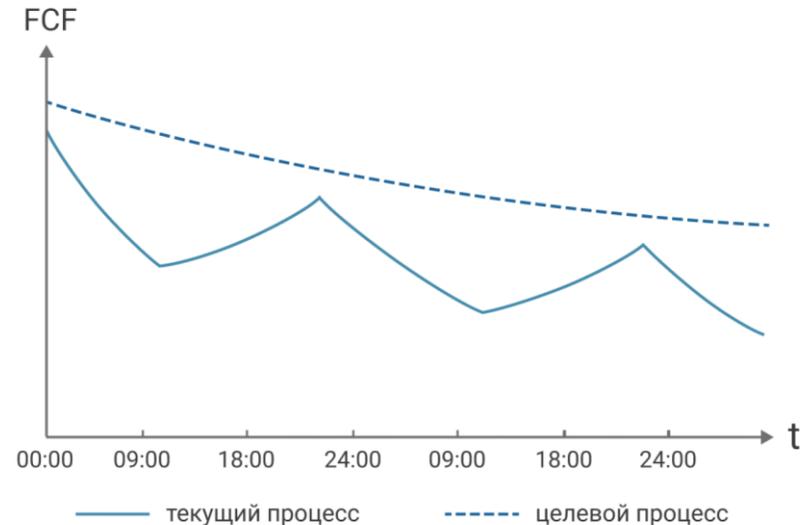


После оптимизации

(+1 мин  $T_{раб}$ )



Приводит к недостаточной эффективности эксплуатации периодического фонда



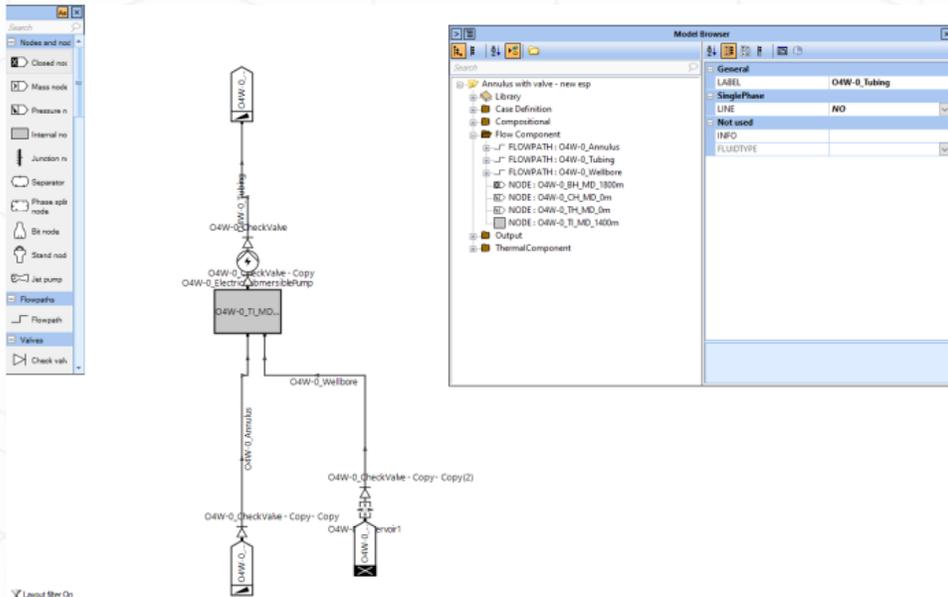


# ПРОБЛЕМАТИКА



Существующие коммерческие решения

Либо слишком сложны для их применения в  
произв. деятельности:



Либо работают по упрощённым принципам:

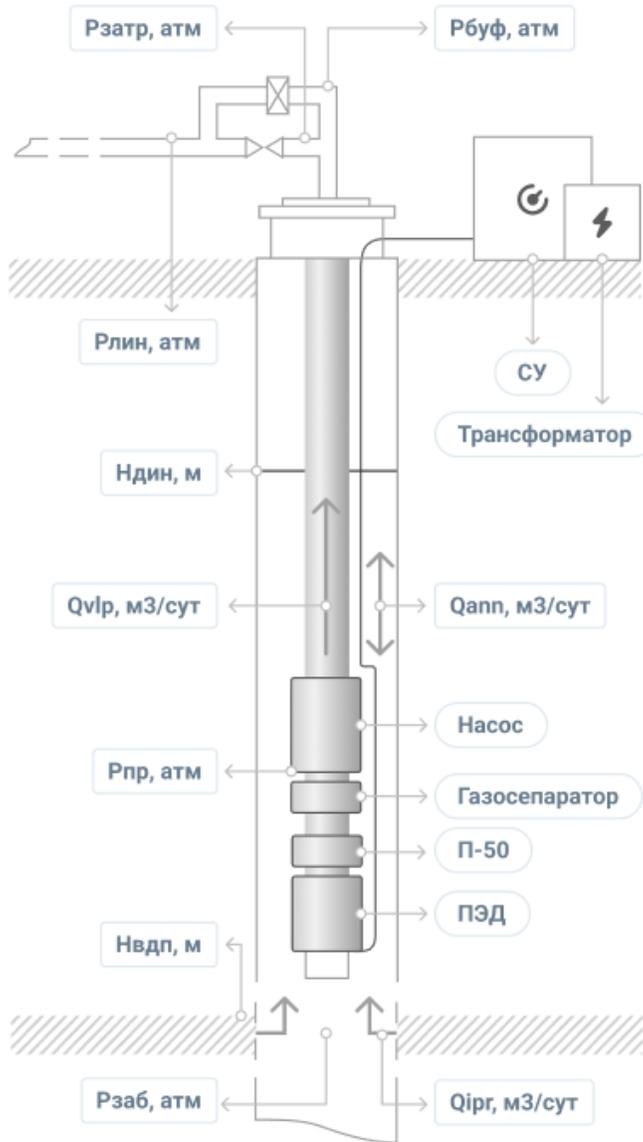




**Цель работы:** разработка и апробация *компромиссного решения*, которое корректно бы отражало поведение периодической скважины как на качественном, так и на количественном уровне, и являлось бы при этом *применимым к прикладным задачам* (оптимизация режимов) в рамках рабочих процессов производственного персонала добывающих обществ.

## **Задачи:**

- Описание математической модели периодической скважины, которая не требует дополнительных данных за рамками того объема, который традиционно ведется в ДО и обладает достаточной точностью описания нестационарных процессов в скважине
- Сравнение получаемого ответа с помощью используемой модели скважины с «эталонным» коммерческим решением
- Разработка алгоритмов реализующих автоматическое создание, адаптацию и актуализацию моделей скважины
- Создание функционала для поиска оптимальных параметров работы периодической скважины с использованием математической модели
- Апробация разработанных программных модулей и подходов на реальных кейсах пилотных месторождений



Математическая модель основана на уравнении баланса потоков на глубине расположения приема насоса

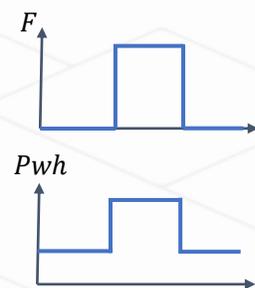
$$Q_{f \text{ casing}}(P_{in}, T_{in}) = Q_{f \text{ tubing}}(P_{in}, T_{in}) + Q_{f \text{ ann}}(P_{in}, T_{in}) \quad \longrightarrow$$

$$\frac{\partial P_{in}}{\partial t} = [Q_{f \text{ tubing}}(P_{in}, T_{in}) - Q_{f \text{ casing}}(P_{in}, T_{in})] \cdot \frac{g(\rho_{g \text{ ann av}} - \rho_{l \text{ ann av}}) D_{ann}(\bar{P}_{ann}, \bar{T}_{ann})}{S_{ann} D_{ann}(P_{in}, T_{in})}$$

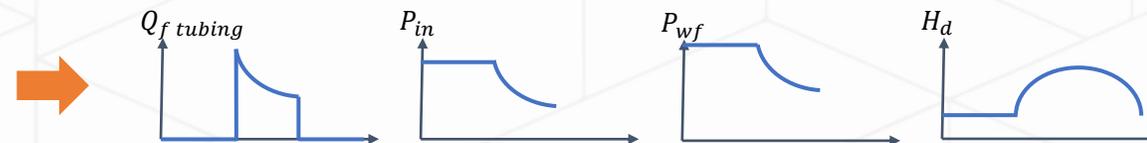
Далее давление на приеме находится итеративно при помощи разложения в степенной ряд:

$$P_{in}(t) = P_{in}(t_0) + \frac{\partial P_{in}}{\partial t}(t - t_0) + \frac{\partial^2 P_{in}}{\partial t^2} \frac{(t - t_0)^2}{2!} + \frac{\partial^3 P_{in}}{\partial t^3} \frac{(t - t_0)^3}{3!} + \dots$$

Входные параметры:



Выходные параметры:

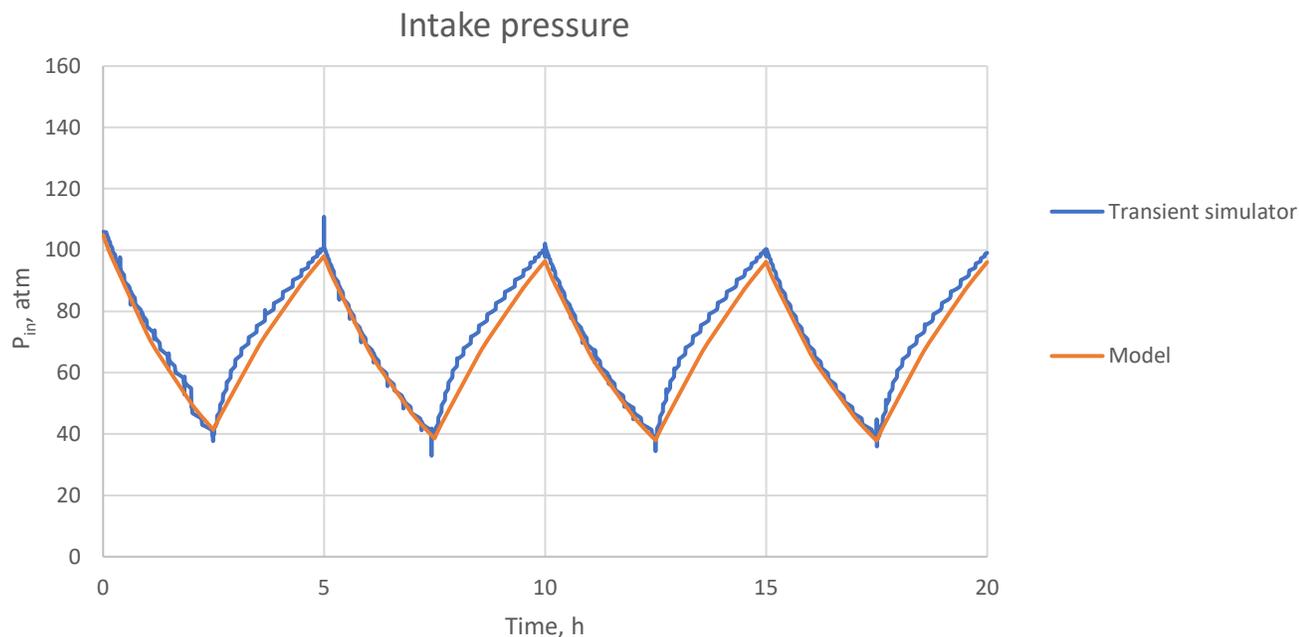




# РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ С ЭТАЛОННЫМ РЕШЕНИЕМ



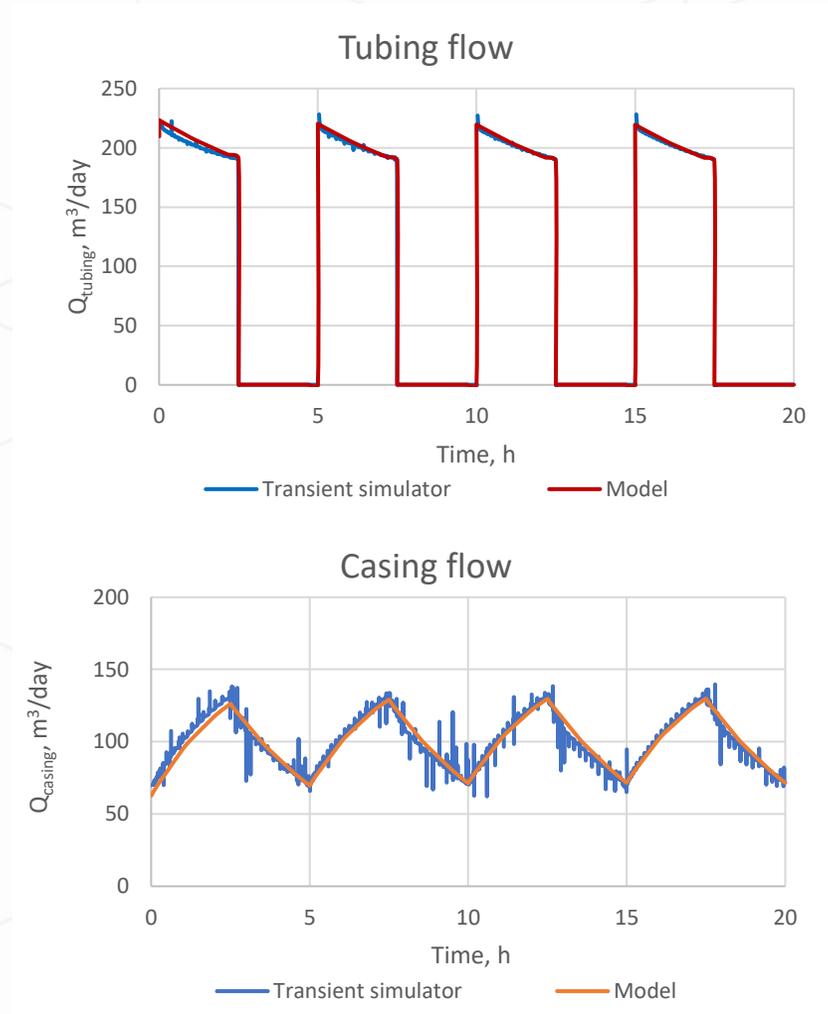
Циклы включения/отключения насоса по 2.5 часа  
(сжимаемый многофазный флюид)



Наблюдаются незначительные расхождения между моделью и «transient simulator» в начале смены режима работы скважины, поскольку в «transient simulator» применяются собственные гидравлические корреляции, отличные от корреляций, используемых в представленной модели.

На графиках решения «transient simulator» присутствуют высокочастотные колебания, которые отсутствуют на кривых представленной модели.

Причина отсутствия – в модели учитывалась только первая производная давления на приеме от времени при разложении в степенной ряд

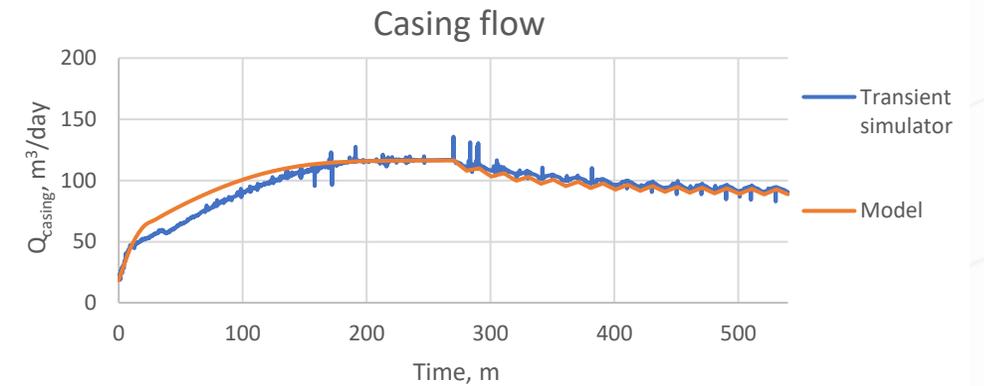
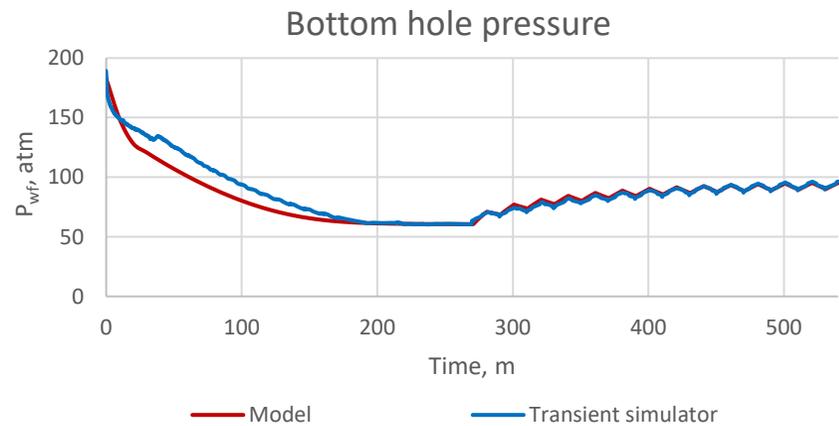
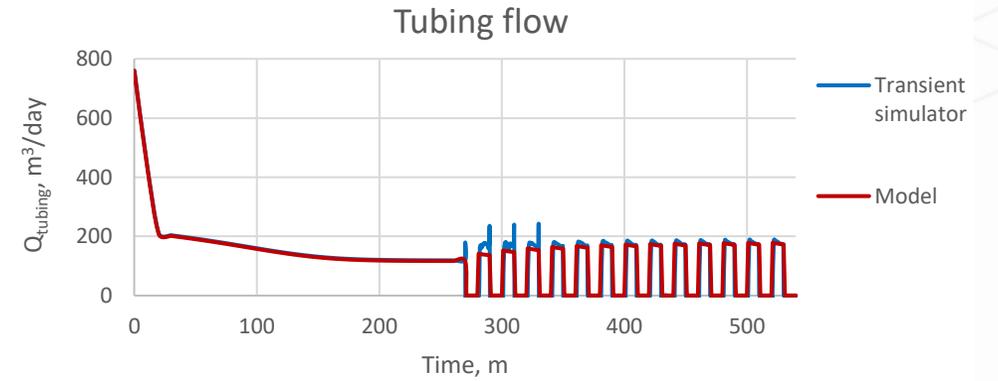
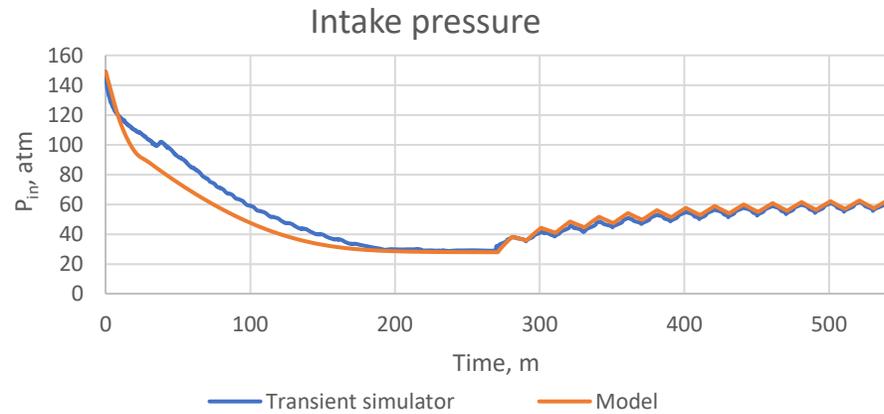




# РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ С ЭТАЛОННЫМ РЕШЕНИЕМ



Циклы по 10 минут  
(сжимаемый многофазный флюид)



## Постановка задачи:

Определение рабочих параметров режима, а именно:

- *давление на приеме;*
- *время работы;*
- *время простоя;*
- *рабочая частота;*
- *частота в режиме накопления,*

которые обеспечивают наибольшую операционную прибыль за счет увеличения объемов добычи или уменьшения расхода электроэнергии с учетом наложенных ограничений.

## Оптимизируемый функционал:

$$FCF \left( \begin{matrix} Q(t_{work}, t_{std}, f_{work}, f_{std}), \\ W(t_{work}, t_{std}, f_{work}, f_{std}) \end{matrix} \right) \rightarrow \max$$

где  $t_{work}/t_{std}$  – время работы/простоя;  
 $f_{work}/f_{std}$  – частота в период работы/простоя;  
 $Q$  – функция дебита жидкости на устье;  
 $W$  – функция потребляемой э/э;  
FCF – свободный денежный поток (free cash flow).

## «Пайплайн» процесса оптимизации параметров работы периодической скважины:





# ОПТИМИЗАЦИЯ: Адаптация модели



## Калибровочные параметры (гидравлика):

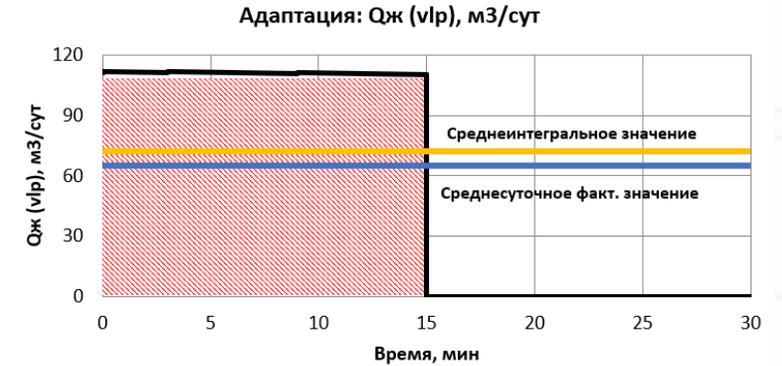
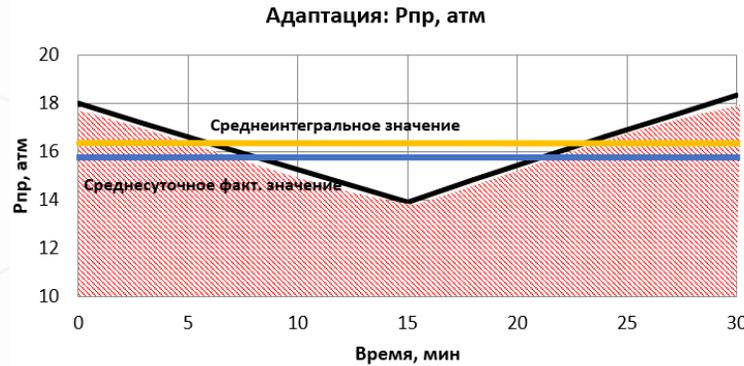
- коэффициент деградации насоса (head factor);
- коэффициент продуктивности.

## Метрики качества:

- среднеинтегральное расхождение расчетного  $P_{in}$  с фактическим среднесуточным;
- среднеинтегральное расхождение расчетного  $Q_{tubing}$  с фактическим среднесуточным;
- абсолютное расхождение крайних точек  $P_{in}$

## Калибровочные параметры (электрика):

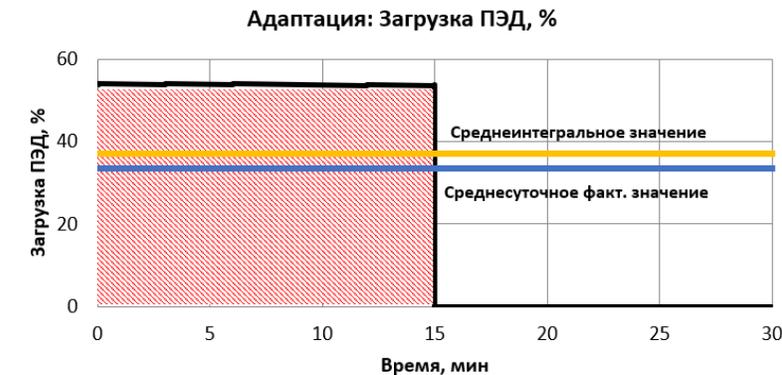
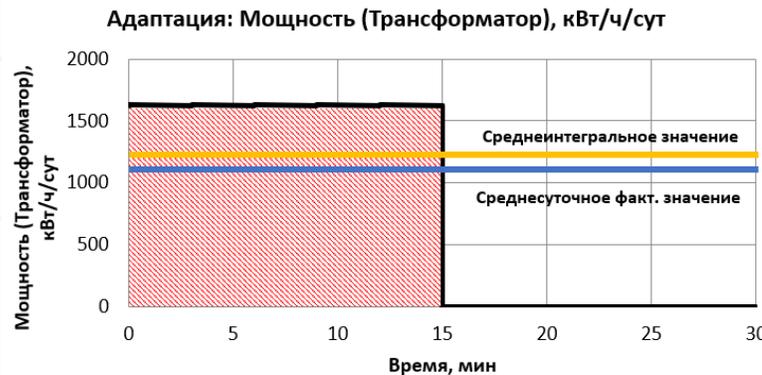
- коэффициент адаптации кривой I/I<sub>ном</sub>(load);
- коэффициент адаптации кривой КПДпэд(load);
- коэффициент адаптации кривой cosf(load);
- температурный коэффициент сопротивления кабеля;
- коэффициент адаптации КПД ТПМН.



$$\begin{aligned} \rightarrow \Delta P_{in} &\rightarrow \min \\ \rightarrow \Delta Q_{tubing} &\rightarrow \min \\ \rightarrow |P_0 - P_{tn}| &\rightarrow \min \end{aligned}$$

$$\Delta_{elec} = \sqrt{(\Delta I)^2 + (\Delta W_{esp})^2 + (\Delta \cos f)^2 + (\Delta U)^2 + (\Delta W_{trans})^2} \rightarrow \min,$$

где  $\Delta I$  – расхождение по току;  $\Delta W_{esp}$  – расхождение по мощности на насосе;  $\Delta \cos f$  – расхождение по коэффициенту мощности;  $\Delta U$  – расхождение по напряжению на отпайке эл. двигателя;  $\Delta W_{trans}$  – расхождение по мощности на трансформате.





# РЕЗУЛЬТАТЫ

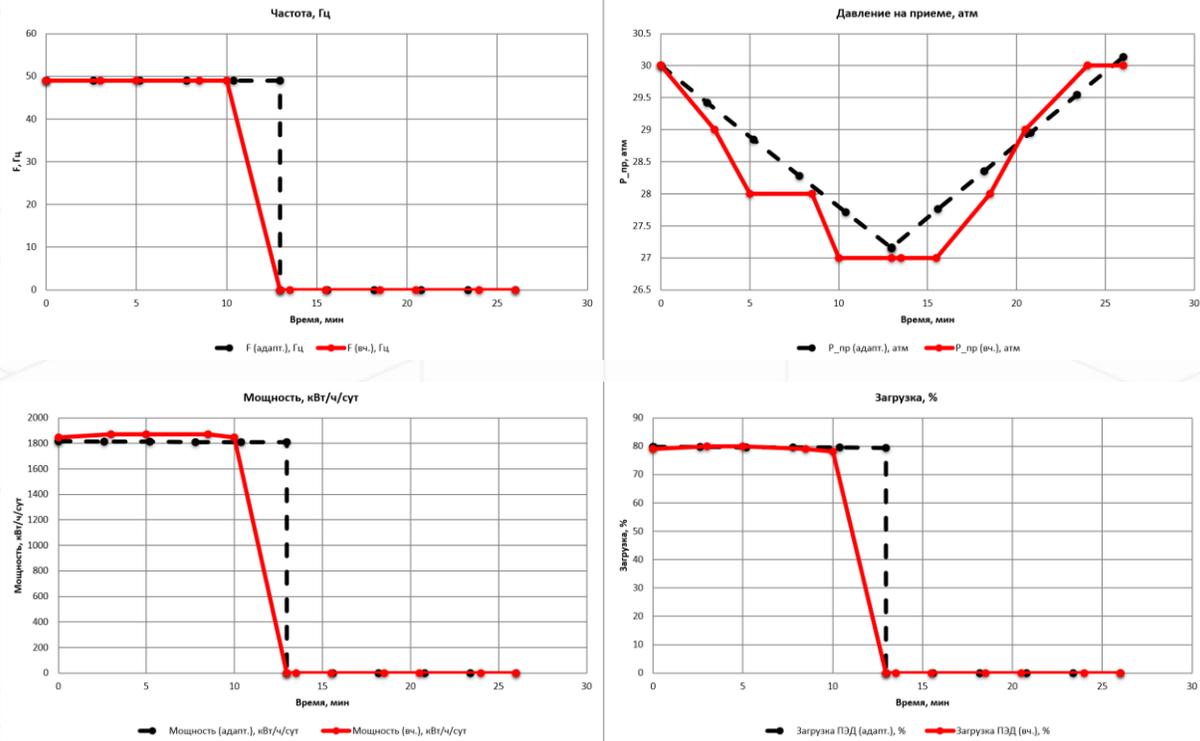


—●— РАСЧЕТ    —●— ФАКТ

## Примеры адаптации скважин

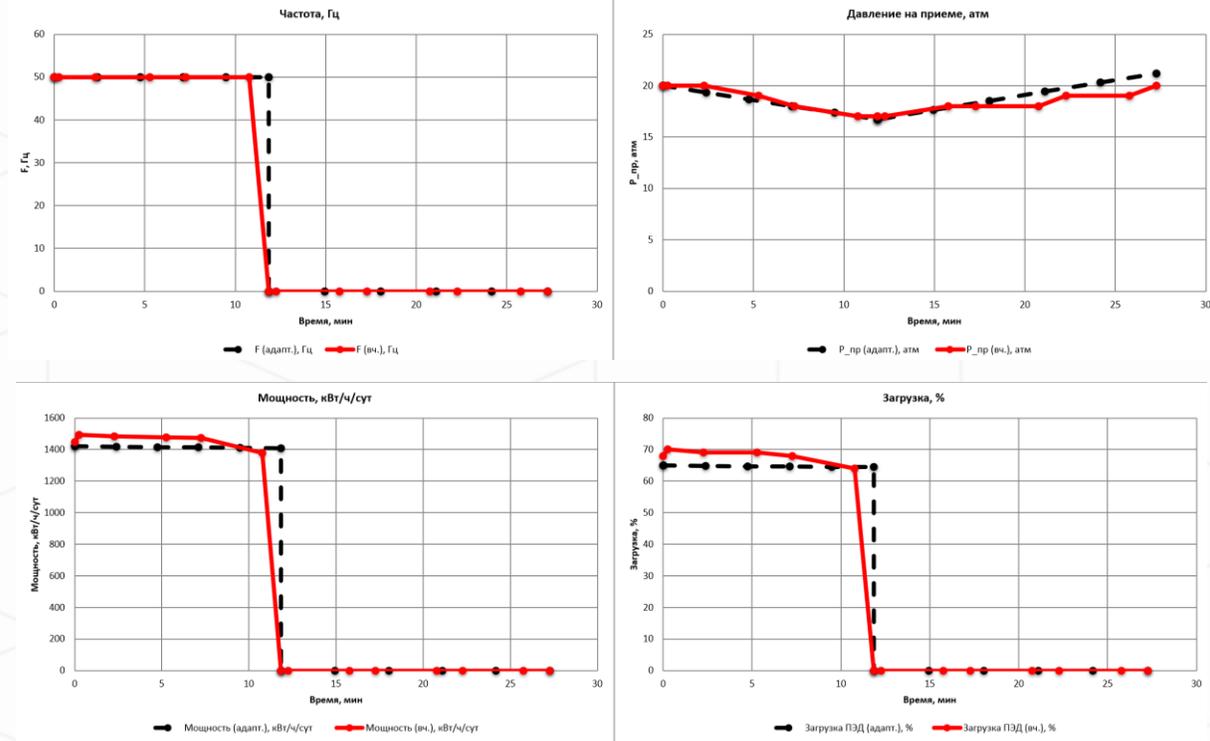
### Скважина №1

(адаптация на среднесуточные показатели)



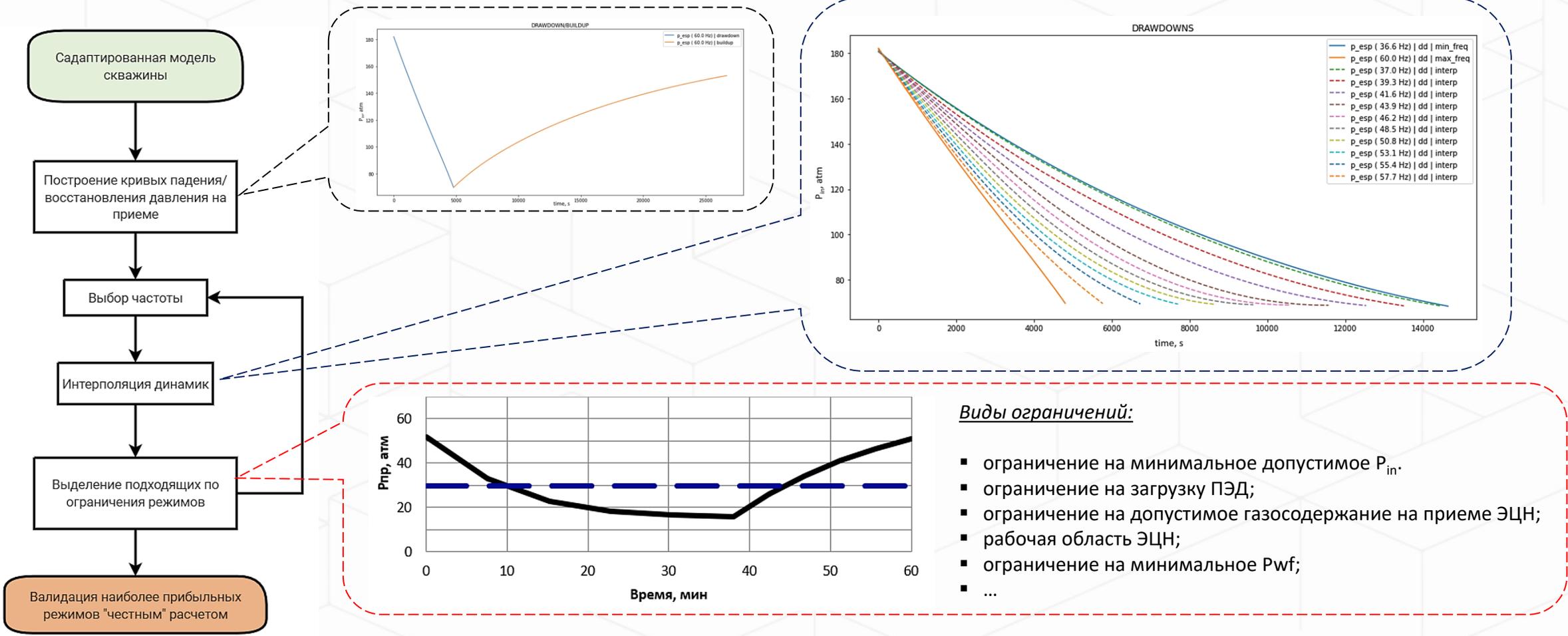
### Скважина №2

(адаптация на высокочастотные измерения телеметрии)





# ОПТИМИЗАЦИЯ: Поиск оптимального режима





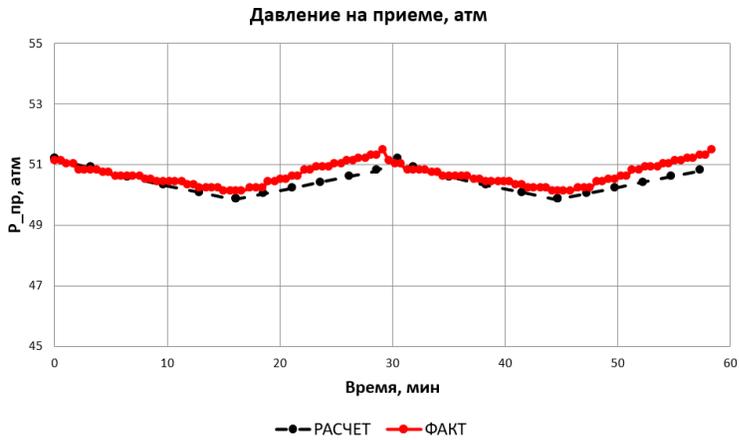
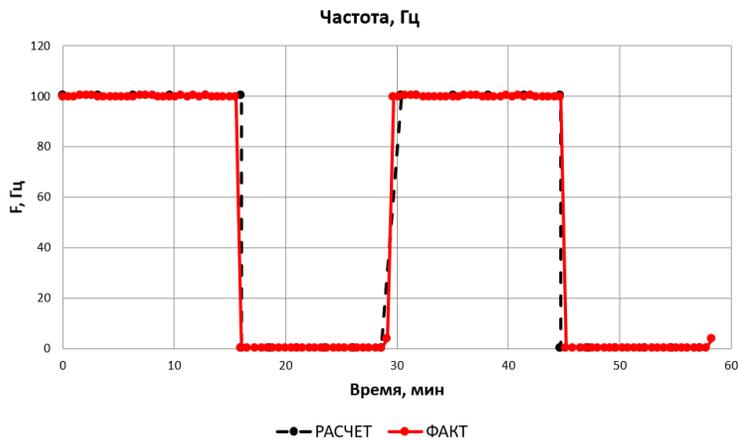
# РЕЗУЛЬТАТЫ



—●— РАСЧЕТ —●— ФАКТ

## Режим до (адаптация)

1. Модель была сааптирована на текущий режим

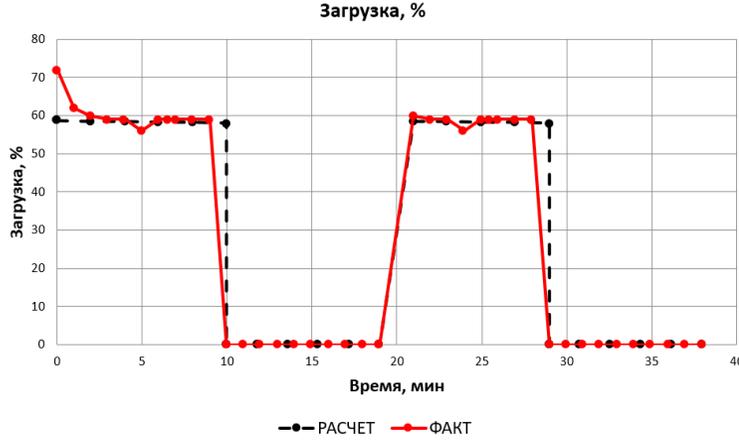
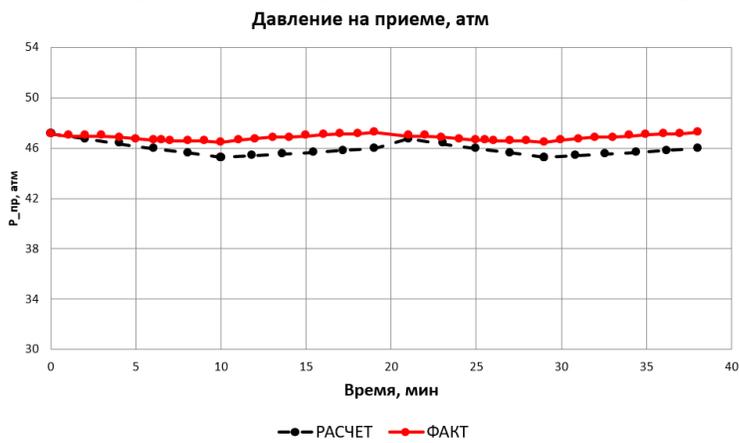
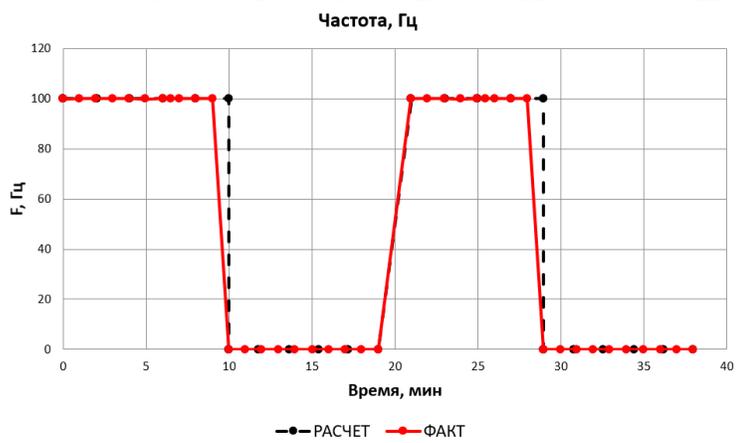


	$F_{\text{раб}}$ , Гц	$T_{\text{раб}}$ , МИН	$T_{\text{нак}}$ , МИН	$Q_{\text{ж}}$ , м <sup>3</sup> /сут	$Q_{\text{ж}}$ (факт), м <sup>3</sup> /сут	$Q_{\text{н}}$ , т/сут	$Q_{\text{н}}$ (факт), т/сут
<b>ДО</b>	100	16	13	18	20.54	3.5	4.1
<b>ПОСЛЕ</b>	100	10 (-6) ↓	9 (-4) ↓	27 (+9) ↑	25 (+4.5) ↑	5.5 (+2) ↑	5.1 (+1) ↑

## Режим после (расчет на модели)

2. С применением сааптированной на предыдущем шаге модели был подобран новый режим

3. После реализации мероприятия, предсказанные с помощью модели динамики были сравнены с реальными





# РЕЗУЛЬТАТЫ



● РАСЧЕТ  
● ФАКТ

С целью подтверждения работоспособности подобраны и реализованы мероприятия по одновременной оптимизации  $F$ ,  $T_{\text{раб}}$  и  $T_{\text{нак}}$ :

До оптимизации  
После оптимизации  
После оптимизации

ФАКТ  
ПРОГНОЗ  
ФАКТ

### Скважина №1

F, Гц	T <sub>раб</sub> , МИН	T <sub>нак</sub> , МИН	Q <sub>жк</sub> , м <sup>3</sup> /сут	Q <sub>ч</sub> , т/сут
49,5	3	17	8	1,4
50 ↑0,5	4 ↑1	11 ↓6	15 ↑8	2,6 ↑1,2
50 ↑0,5	4 ↑1	11 ↓6	12,2 ↑4,2	2,1 ↑0,7

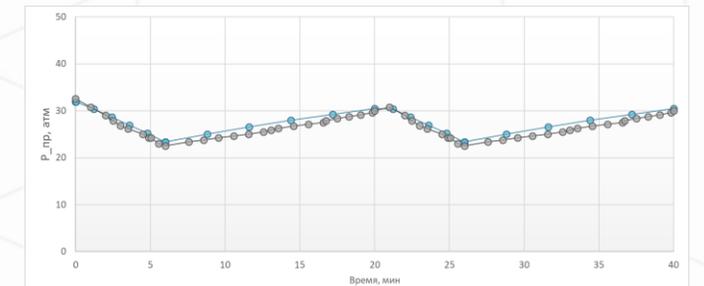
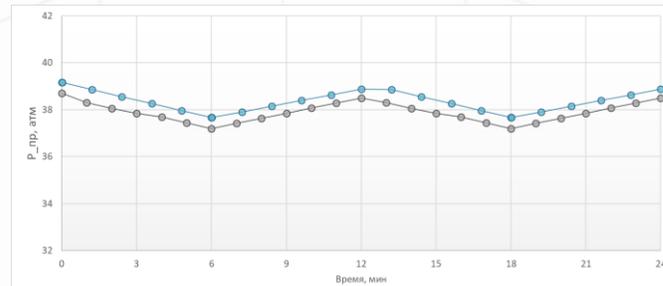
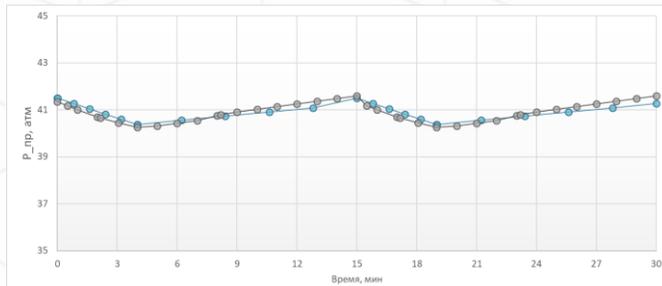
### Скважина №2

F, Гц	T <sub>раб</sub> , МИН	T <sub>нак</sub> , МИН	Q <sub>жк</sub> , м <sup>3</sup> /сут	Q <sub>ч</sub> , т/сут
51	5	5	32	3,6
53 ↑2	6 ↑1	6 ↑1	38 ↑6	4,3 ↑0,7
53 ↑2	6 ↑1	6 ↑1	35,2 ↑3,2	4 ↑0,4

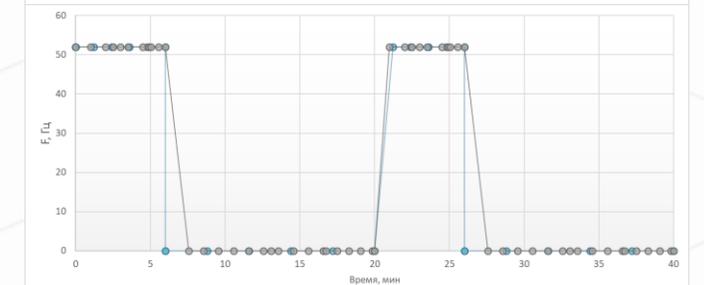
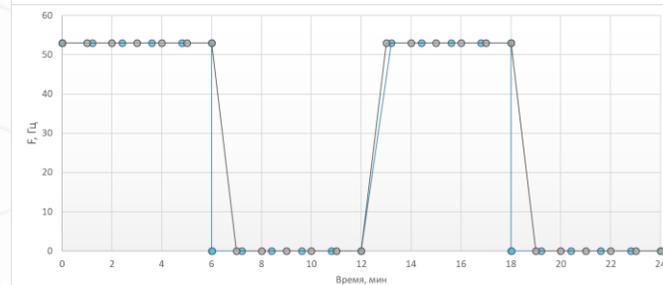
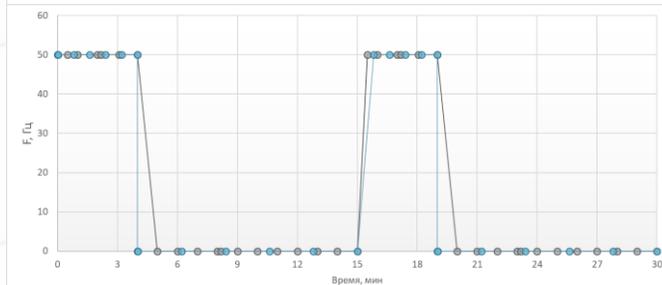
### Скважина №3

F, Гц	T <sub>раб</sub> , МИН	T <sub>нак</sub> , МИН	Q <sub>жк</sub> , м <sup>3</sup> /сут	Q <sub>ч</sub> , т/сут
55	4	13	15	4
52 ↓3	6 ↑2	14 ↑1	17 ↑2	4,5 ↑0,5
52 ↓3	6 ↑2	14 ↑1	16,9 ↑1,9	4,5 ↑0,5

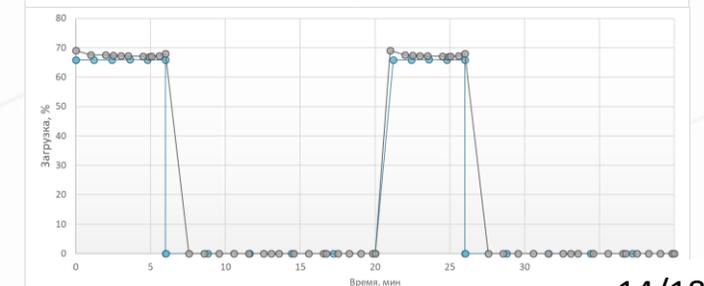
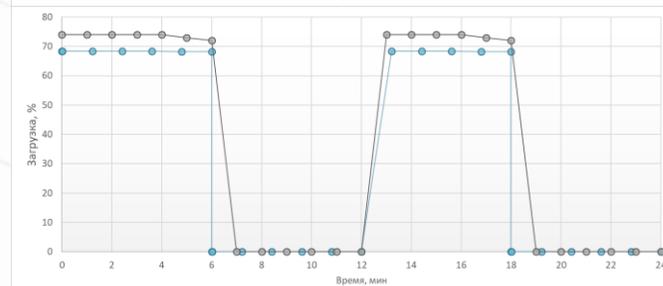
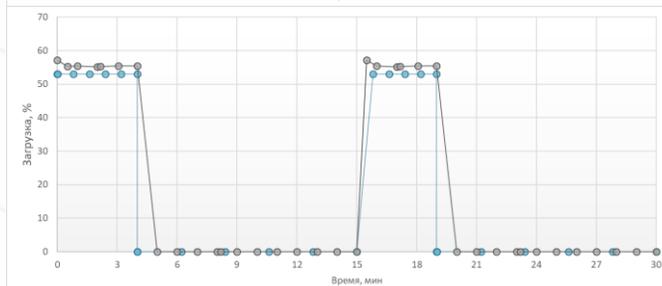
Давление на приеме, атм



Частота, Гц



Загрузка, %



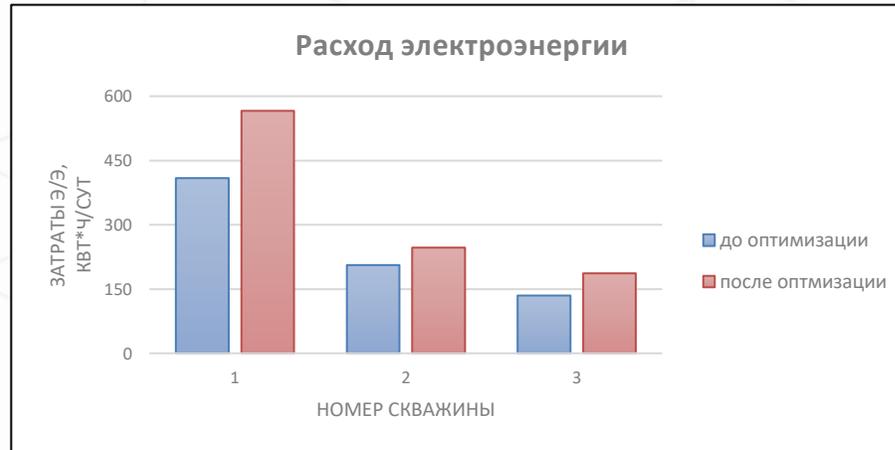
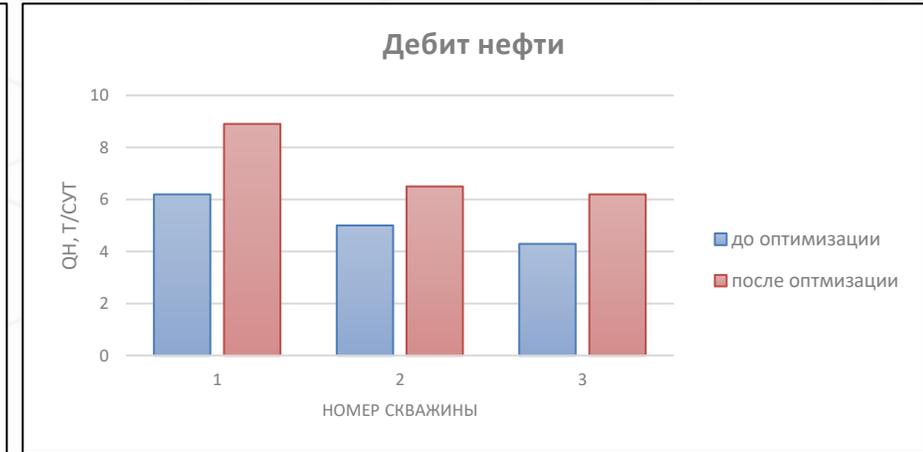
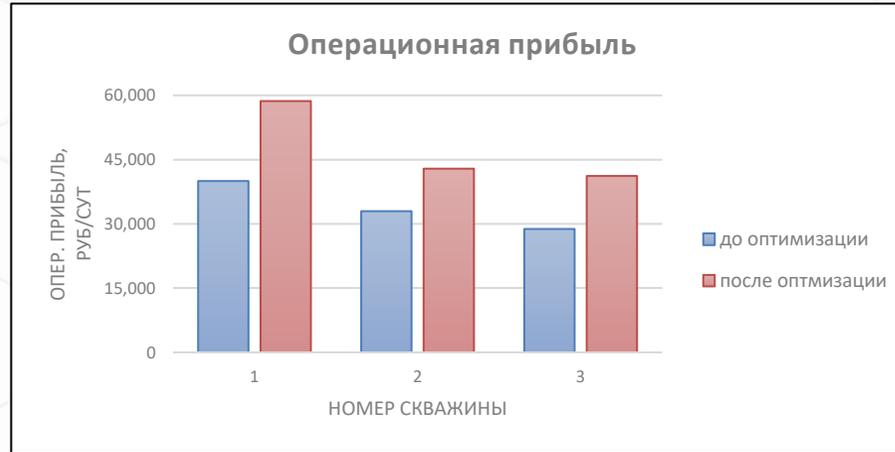


# РЕЗУЛЬТАТЫ



Пример оптимизации режима работы скважин путем увеличения добычи

Номер скважины	Эффект		
	Эк. прирост, руб/сут	Прирост по добыче нефти, т/сут	Разница потребления э/э, кВт*ч/сут
1	+ 18 700	+ 2.7	+ 157
2	+ 9 900	+ 1.5	+ 41
3	+ 12 400	+ 1.9	+ 53
<b>Итого</b>	<b>+41 000</b>	<b>+ 6.1</b>	<b>+ 251</b>



Номер скважины	Режим до оптимизации				Режим после оптимизации			
	$F_{раб}$ , Гц	$T_{раб}$ , мин	$T_{нак}$ , мин	$P_{пр}$ , атм	$F_{раб}$ , Гц	$T_{раб}$ , мин	$T_{нак}$ , мин	$P_{пр}$ , атм
1	52.5	5	24	42.6	52.9 ↑	7 ↑	23 ↓	42.4 ↓
2	100.2	15	40	41	100.4 ↑	13 ↓	27 ↓	39 ↓
3	53	3	27	35.3	53.8 ↑	6 ↑	39 ↑	33.1 ↓

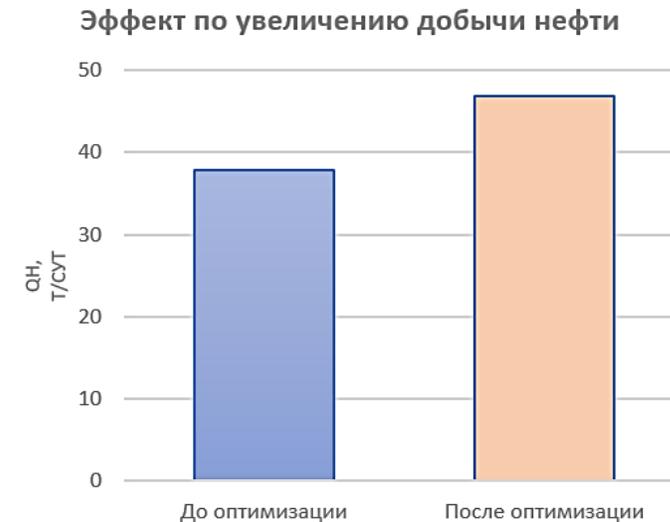
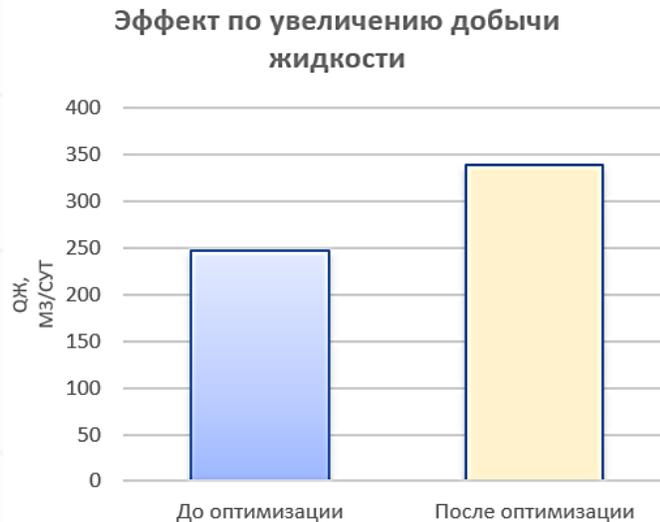


# РЕЗУЛЬТАТЫ



Сводка суммарных эффектов от проведения мероприятий для месторождения **малых размеров**:

- прирост по добыче нефти ~ 25%
- сокращение УРЭ – ~ 30%.



На фондах **более крупного размера** ожидаемые эффекты в среднем достигают:

- 1-5 % увеличения добычи
- 3-10% сокращения УРЭ.



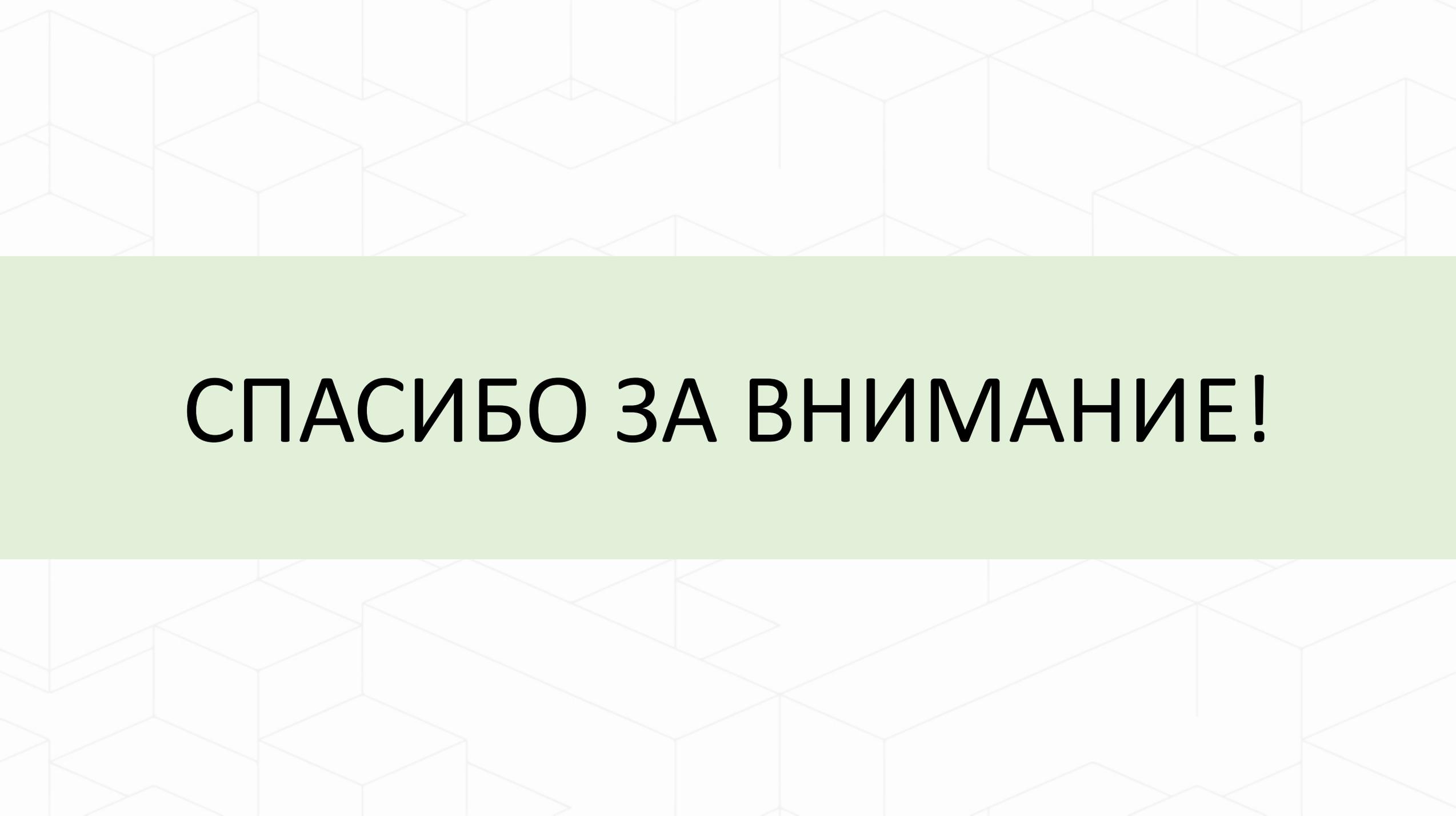
# ВЫВОДЫ



- ❖ Использованная в работе модель на широкой выборке тестов демонстрирует хорошую сходимость с результатами расчётов, полученными с использованием коммерческих программных продуктов, предназначенных для решения задач моделирования многофазных неустановившихся течений в скважинах
- ❖ Разработаны алгоритмы автоматизации процессов создания и адаптации физико-математической модели скважины, работающей в периодическом режиме эксплуатации
  - разработанные алгоритмы поддерживают возможность варьирования адаптационных коэффициентов для обеспечения сходимости расчётных показателей работы скважины с фактическими при использовании как среднесуточных, так и высокочастотных данных.
  - реализованы алгоритмы автоматизированной верификации адаптированной модели путём анализа сходимости расчётных значений динамик гидравлических и электротехнических показателей работы скважины с фактическими внутрисуточными данными, получаемыми с телеметрических систем
- ❖ Разработаны автоматизированные алгоритмы оптимизации технологических режимов работы ПКВ, АПВ скважин с использованием представленной физико-математической модели
  - разработанные алгоритмы условной оптимизации позволяют решать задачи максимизации FCF / дебита нефти скважины
  - разработанные алгоритмы условной оптимизации поддерживают возможность задания ограничений как непосредственно на варьируемые управляющие воздействия (частоты и длительности интервалов цикла), так и на допустимые технологические показатели работы скважины по результатам оптимизации.
- ❖ Реализованные алгоритмы протестированы путем экспертизы и реализации подобранных мероприятий совместно со специалистами с промысла. Эффекты от реализованных мероприятий подтверждены.

## Публикации:

1. Modeling and Optimization of ESP Wells Operating in Intermittent Mode / E. Yudin, G. Piotrovskiy, M. Petrushin, N. Smirnov [et al.] // SPE-212116-MS. - 2022. - DOI: <https://doi.org/10.2118/212116-MS>
2. Методы моделирования и оптимизации периодических режимов работы скважин, оборудованных установками электроцентробежных насосов / Е.В. Юдин, Г.А. Пиотровский, М.А. Петрушин, Н.А. Смирнов [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 5. – С. 116-122. - <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-5-116-122>



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

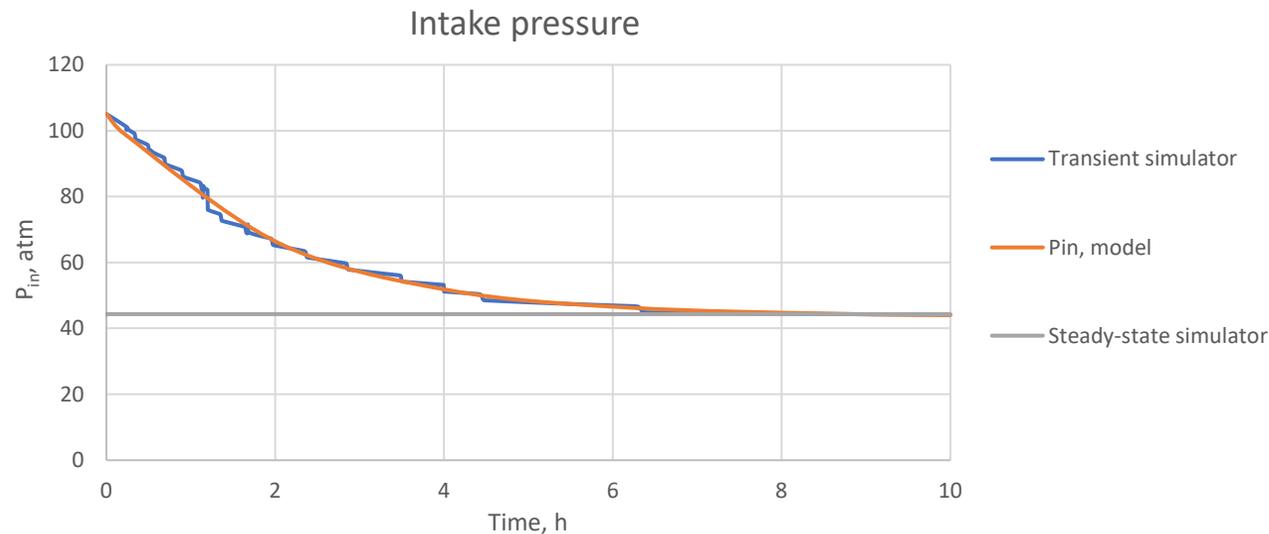


# РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ С ЭТАЛОННЫМ РЕШЕНИЕМ



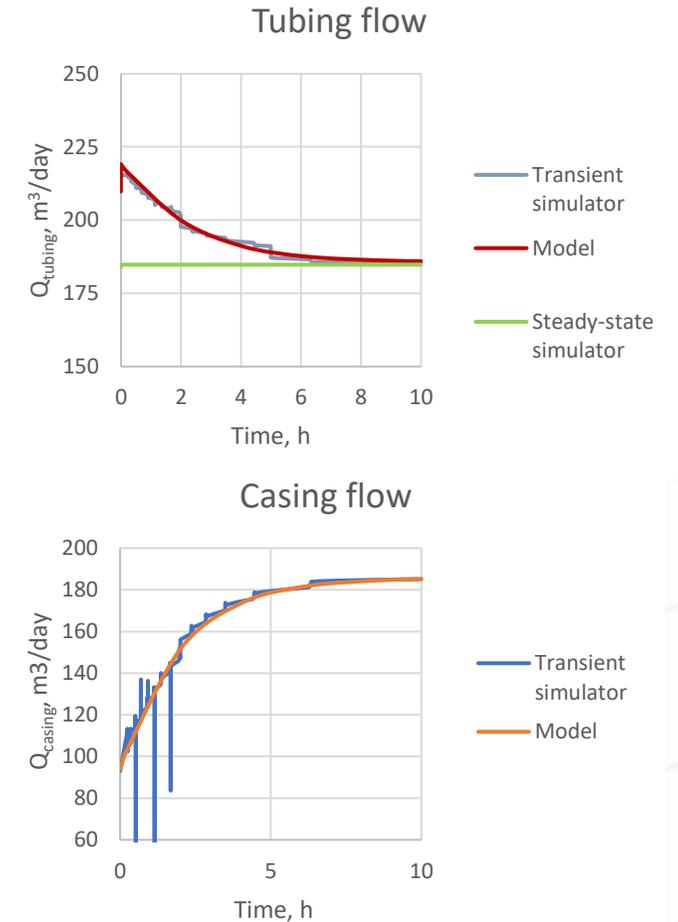
## Выход на стационарный режим (сжимаемый многофазный флюид)

Тестовый случай для сжимаемого многофазного флюида: выход на установившийся режим после воздействия на скважину посредством изменения буферного давления с 50 до 10 атм.



На графиках решения «transient simulator» присутствуют высокочастотные колебания, которые отсутствуют на кривых представленной модели.

Причина отсутствия – в модели учитывалась только первая производная давления на приеме от времени при разложении в степенной ряд



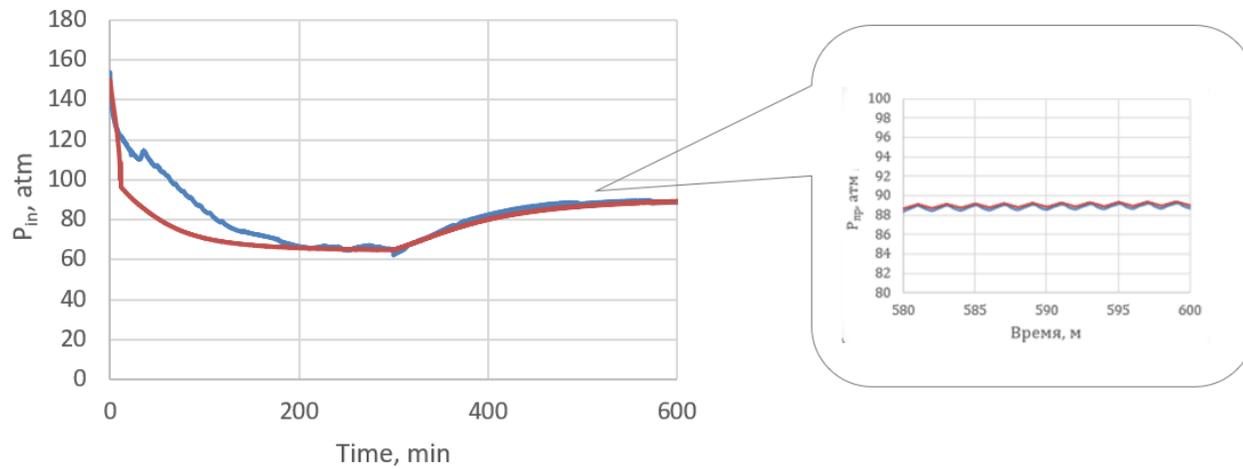


# РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ С ЭТАЛОННЫМ РЕШЕНИЕМ

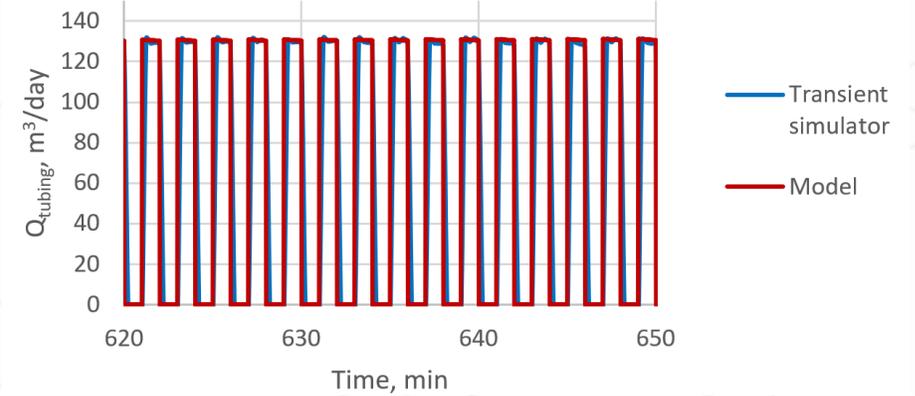


Короткие циклы по 1 минуте (сжимаемый многофазный флюид)

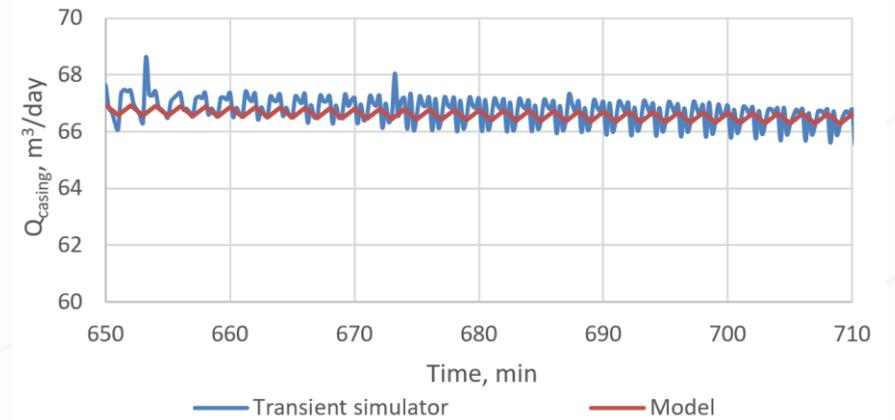
Intake pressure



Tubing flow

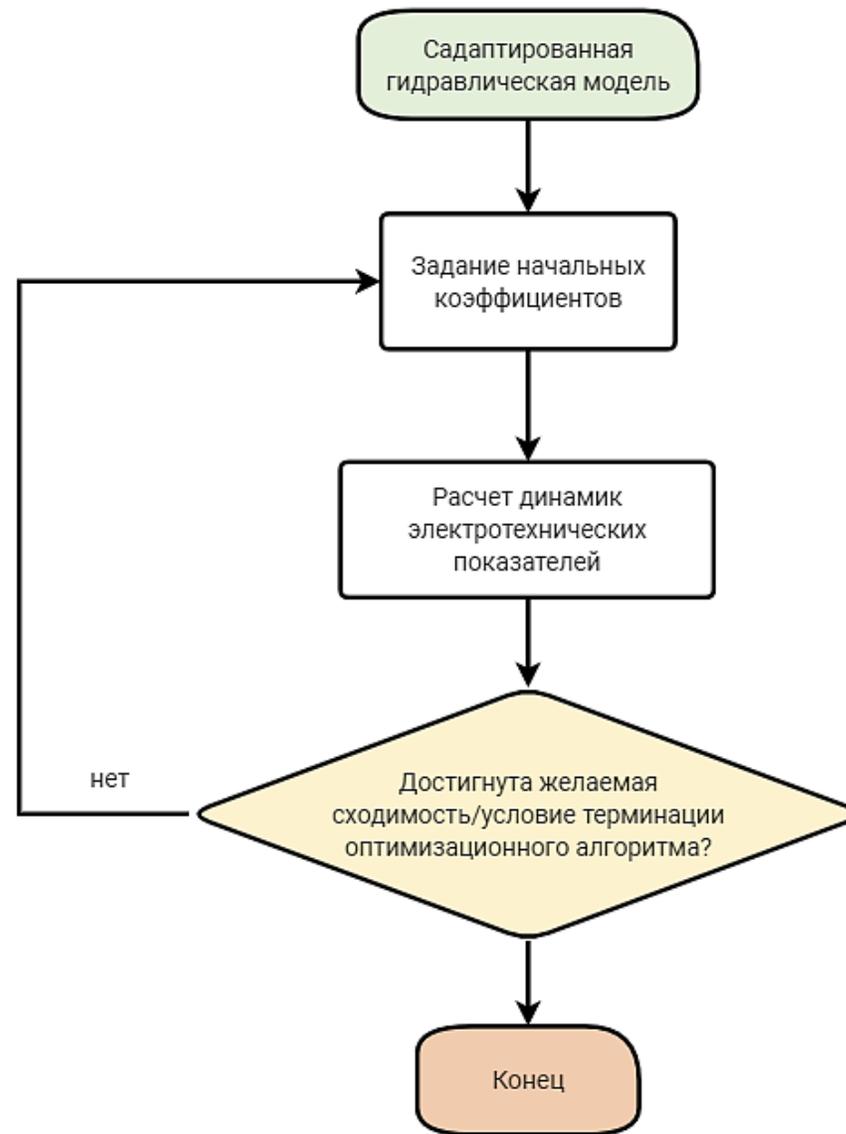
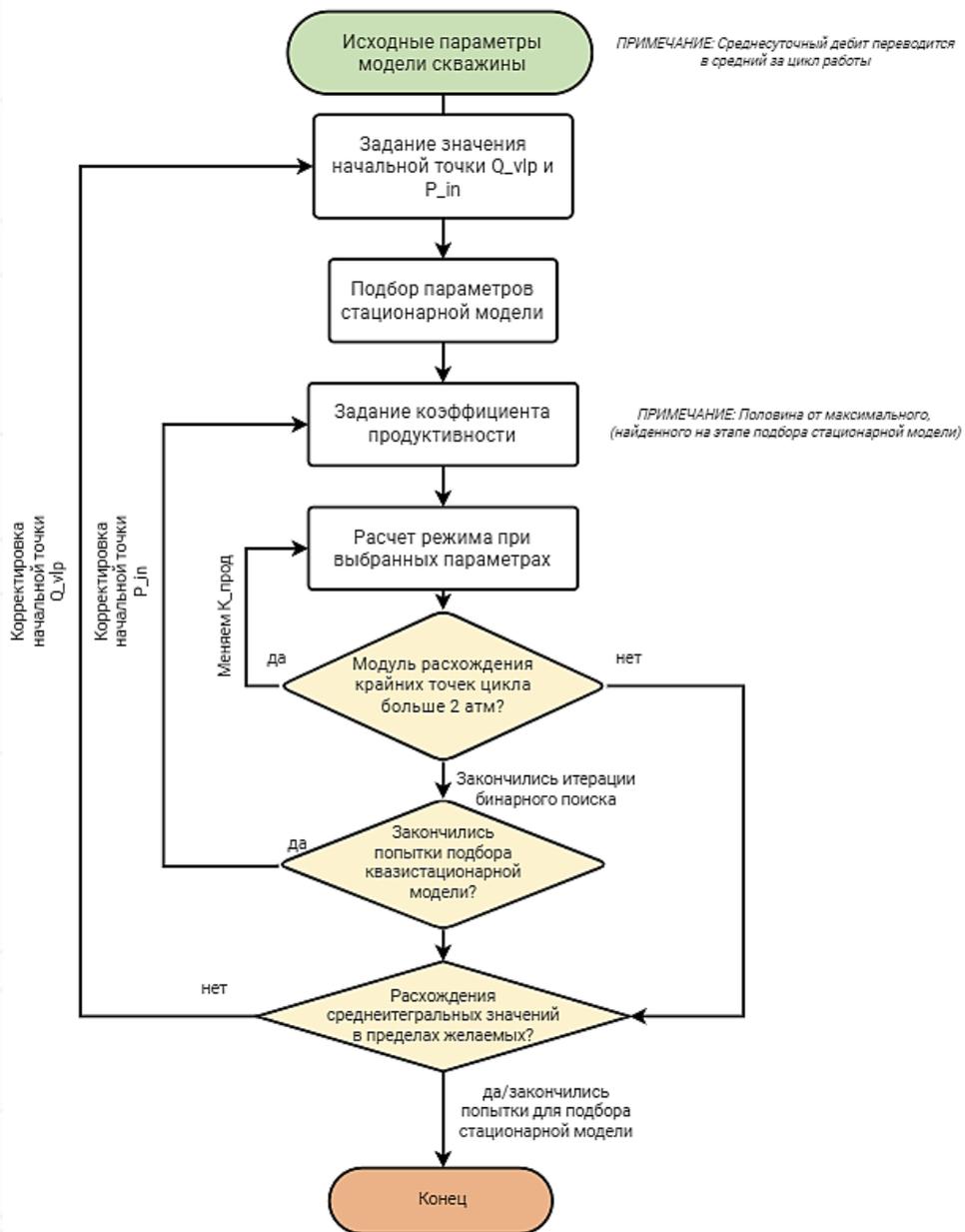


Casing flow





# ОПТИМИЗАЦИЯ: Адаптация модели

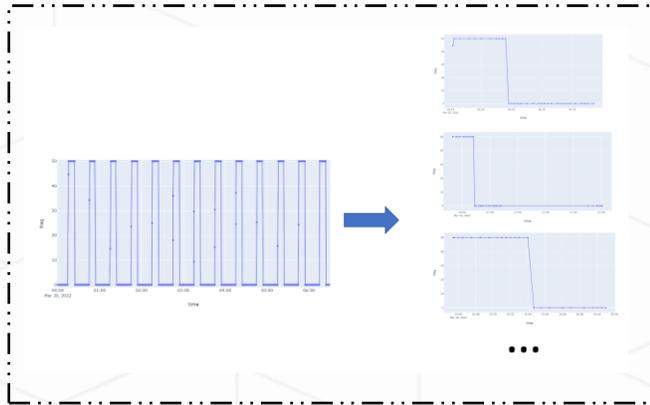
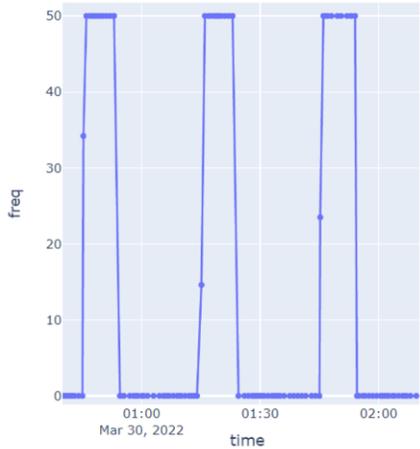




# ОПТИМИЗАЦИЯ: Адаптация модели



## Высокая дискретность измерений телеметрии

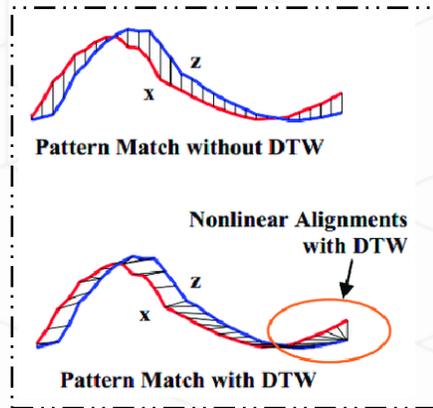


1. Поиск «характерного паттерна» работы скважины во временном ряде;

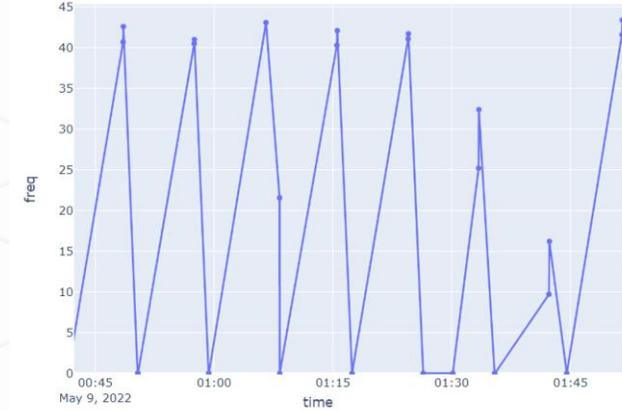
1.1 Сегментация

1.2 Кластеризация методом «K-Medoids» с использованием метрики DTW в качестве функции расстояния

2. Усреднение параметров в найденном цикле

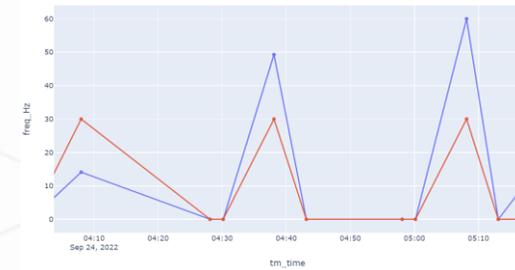
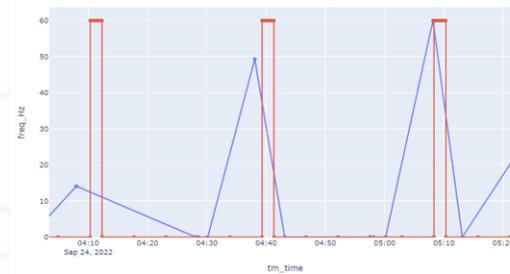


## Низкая дискретность измерений телеметрии



1. Перевод низкодискретных значений динамик с телеметрии в среднесуточные;

2. Выравнивание дискретности двух временных рядов (расчетного и телеметрии), расчёт DTW расстояния.

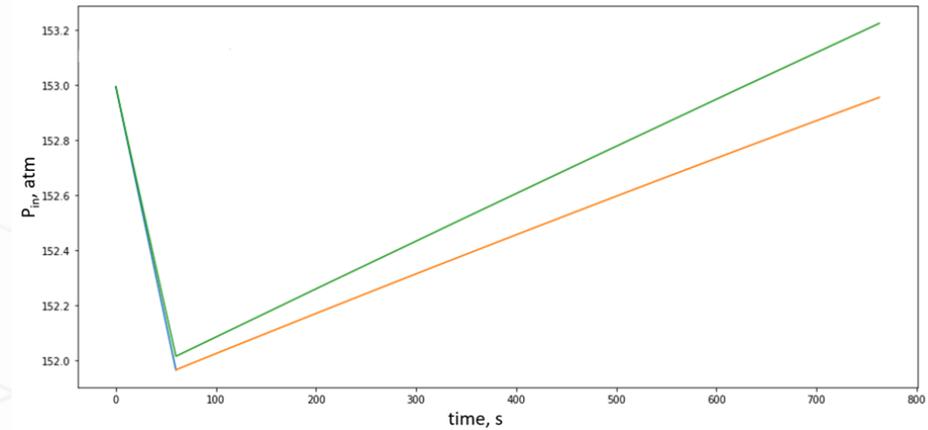




# ОПТИМИЗАЦИЯ: Поиск оптимального режима

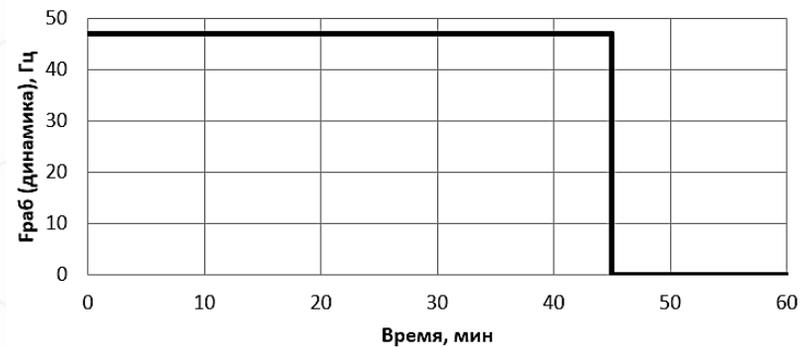


Сравнение интерполированной динамики давления на приеме с динамикой, рассчитанной на модели (зеленым цветом помечена динамика, рассчитанная на модели)



Пример моделирования скважины, работающей со срывами подачи

Адаптация: Граб (динамика), Гц



Адаптация: Pпр, атм

