



**ПОЛИТЕХ**

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

[spbstu.ru](http://spbstu.ru)

# Определение дебитов добывающих скважин с учетом поверхностной сети трубопроводов

---

Студент: ВШТМиМФ, группы 5040103/10401

***Бровин Николай Михайлович***

Научный руководитель:

***д.ф.-м.н. , профессор ВШТМиМФ А. В. Порубов***

## АКТУАЛЬНОСТЬ

---

Актуальным является вопрос об эффективном проектировании и эксплуатации систем сбора и транспорта нефти и газа



Коммерческие реализации расчетных модулей систем сбора характеризуются высокой длительностью расчета, что может накладывать некоторые ограничения на проведение многовариантных расчетов



Наличие упрощенных расчетных модулей сети сбора позволяет оперативно решать оптимизационные задачи и снимать некоторые неопределенности, что способствует увеличению эффективности процессов сбора и транспортировки нефтегазовой продукции

## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

---

### ЦЕЛЬ

Разработка упрощенной физико-математической модели системы сбора для ускорения расчетов

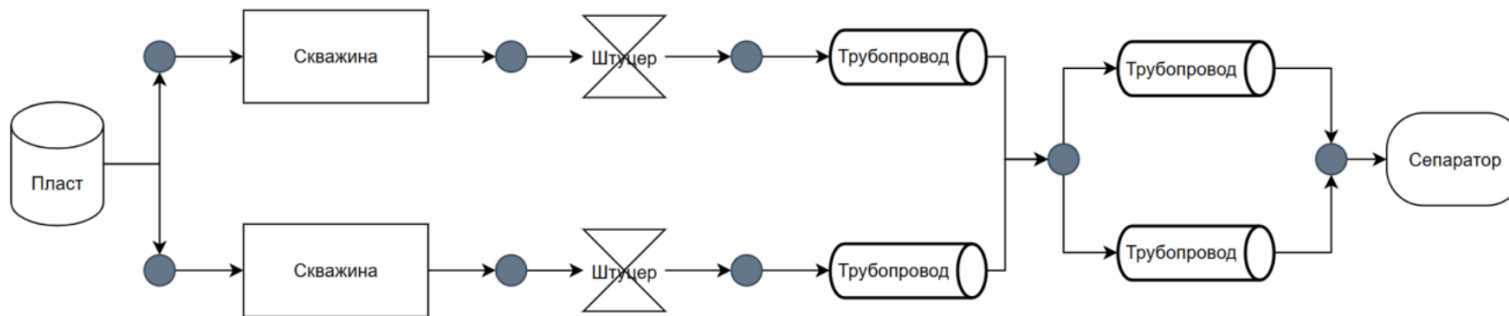
### ЗАДАЧИ

- Рассмотреть основы моделирования систем сбора
- Рассмотреть теоретические основы расчета систем сбора
- Сформулировать упрощенный подход к расчету систем сбора
- Реализовать расчетный модуль систем сбора
- Проанализировать результаты расчета модели системы сбора упрощенным методом

# СИСТЕМА СБОРА

- комплексная разветвленная сеть трубопроводов и оборудования, построенная для осуществления сбора продукции от добывающих скважин и ее транспортировки в центры подготовки нефти и газа

Связный граф, как правило, древовидной структуры  
(возможно наличие лупингов)



Коммерческие симуляторы  
системы сбора

Производитель	Симулятор
Petroleum Experts	GAP
Schlumberger	PIPESIM
Рок Флоу Динамикс	tНавигатор (Дизайнер сетей)

# СИСТЕМА СБОРА

---

Оптимизация системы сбора – процесс, требующий проведения многовариантных расчетов

## ЗАДАЧИ

- Оптимизация режимов работы скважин
- Оптимизация пропускной способности системы (устранение узких мест)
- Оптимизация способов эксплуатации скважин
- Оптимизация расположения площадных объектов в сети
- Оптимизация конфигурации системы сбора
- Оптимизация графика бурения скважин
- Оптимизация нерентабельного фонда

## РЕШЕНИЕ

Разработка упрощенного расчетного модуля для проведения оптимизации

## ЭФФЕКТ

- Ускорение расчетов
- Увеличение охвата расчетами различных кейсов
- Увеличение частоты проведения расчетов
- Возможность выполнения задач, не рассматриваемых ранее из-за длительности расчетов

# РАСЧЕТ СИСТЕМЫ СБОРА

## Индикаторная диаграмма = Кривая притока = IPR

- характеризует приток в скважину
- связь между дебитом и забойным давлением

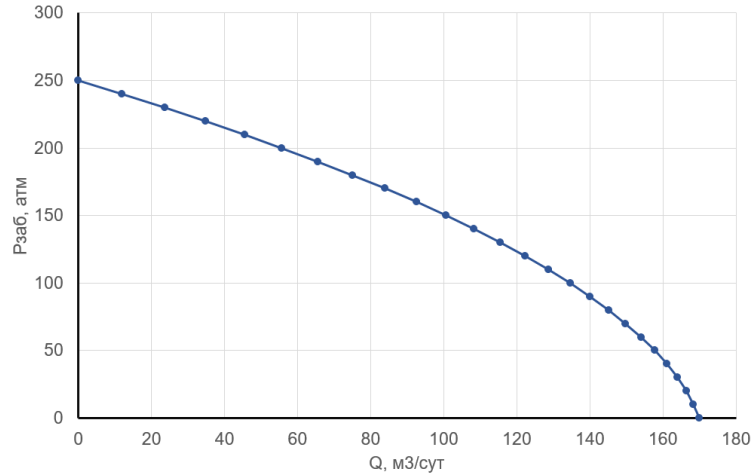
$$\frac{q_0}{(q_0)_{max}} = 1 - 0,2 \frac{P_{заб}}{P_{пл}} - 0,8 \left( \frac{P_{заб}}{P_{пл}} \right)^2$$

где  $q_0$  – дебит скважины;

$P_{заб}$  – забойное давление;

$P_{пл}$  – пластовое давление;

$(q_0)_{max}$  – дебит скважины при  $P_{заб} = 0$ .



## Характеристика лифта = Кривая оттока = VFP

- характеризует отток из скважины
- связь между дебитом и забойным давлением

$$\frac{dP}{dL} = -(\rho g \sin \theta + \frac{\rho}{2d} f v^2 + \rho v \frac{dv}{dL})$$

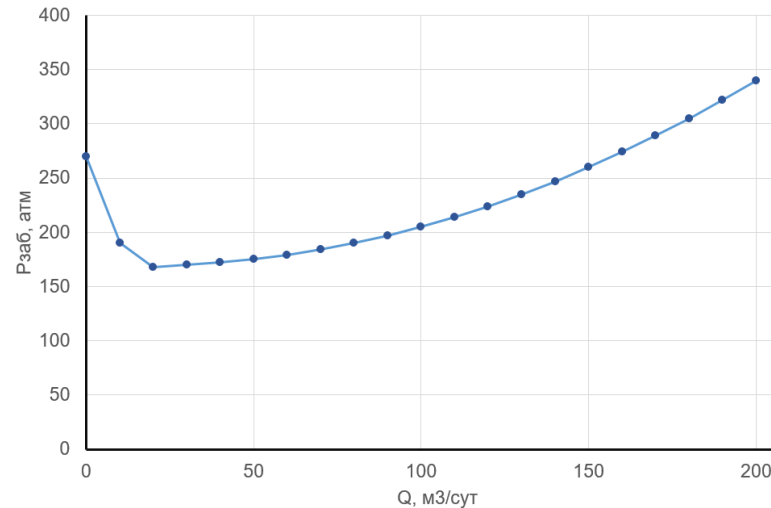
$\frac{dP}{dL}$  – градиент давления;

$\rho$  – плотность жидкости;

$d$  – внутренний диаметр трубопровода;

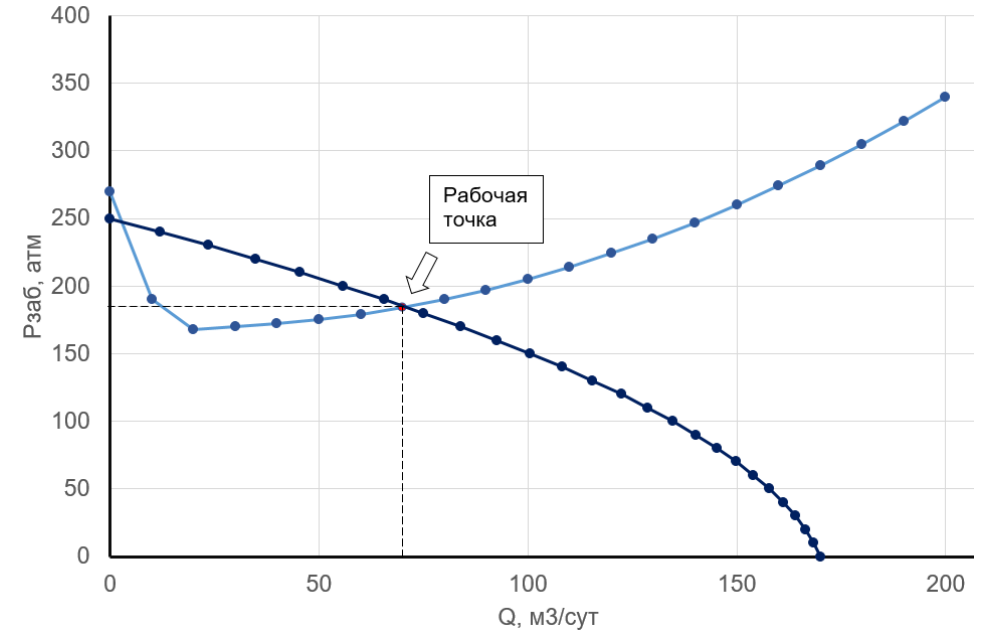
$\theta$  – угол наклона трубопровода к горизонтали;

$v$  – скорость потока.



## Узловой анализ

- пересечение кривой притока и кривой оттока стабильной области характеризует рабочую точку скважины



$$IPR(P_{пл}, J, q_{СКВ}) = VFP(P_y, WCT, GOR, FREQ, q_{СКВ})$$

# РАСЧЕТ СИСТЕМЫ СБОРА

## Общий принцип расчета

- Запись матрицы смежности
- Запись базовых соотношений
- Решение системы уравнений

$$m_{in} = m_{out}$$

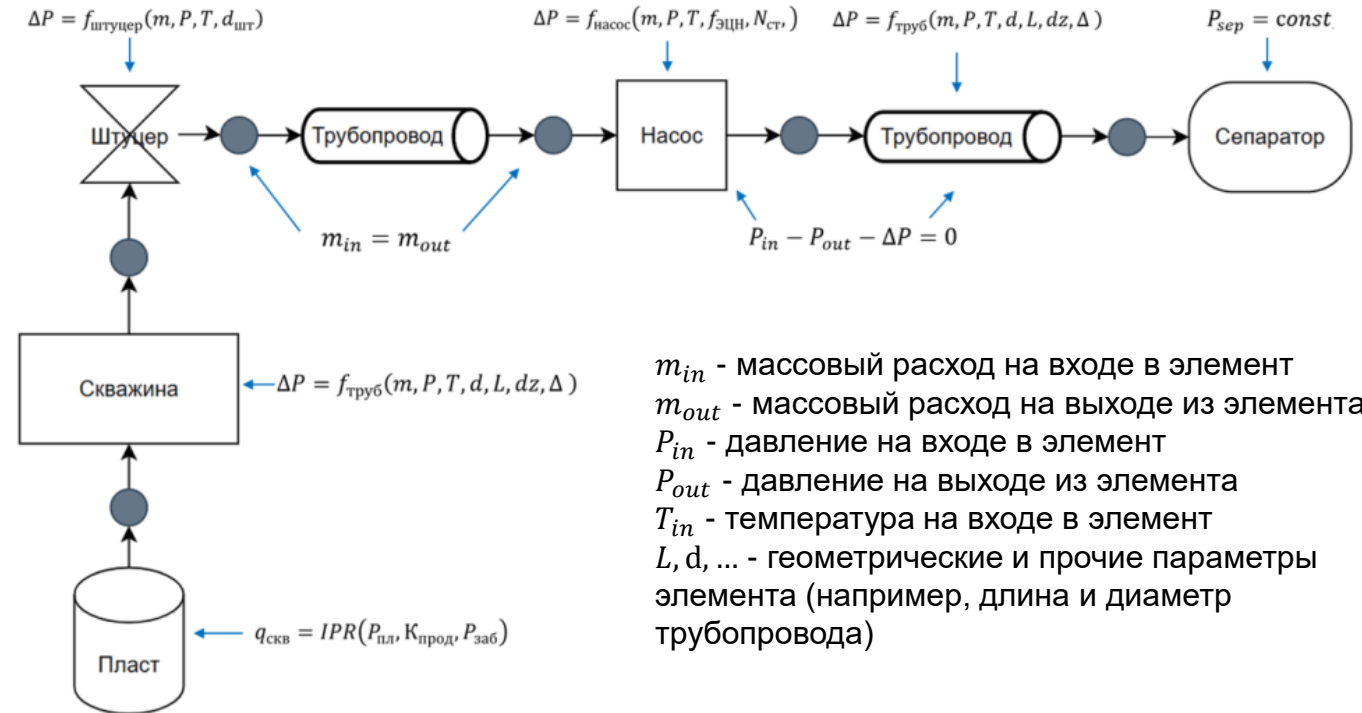
$$P_{in} - P_{out} - \Delta P = 0$$

$$\Delta P = f(m, P_{in}, T_{in}, L, d, \dots)$$

$$P_{sep} = const$$

## Недостатки

- Часто наблюдается отсутствие сходимости расчета
- Длительное переключение состояния скважин



$m_{in}$  - массовый расход на входе в элемент  
 $m_{out}$  - массовый расход на выходе из элемента  
 $P_{in}$  - давление на входе в элемент  
 $P_{out}$  - давление на выходе из элемента  
 $T_{in}$  - температура на входе в элемент  
 $L, d, \dots$  - геометрические и прочие параметры элемента (например, длина и диаметр трубопровода)

# АЛГОРИТМ РАСЧЕТА С МИНИМИЗАЦИЕЙ ОШИБКИ



$$f = \text{abs}(P_{\text{заб}_{ipr}} - P_{\text{заб}_{vfp}})$$

Преимущества	Недостатки
Отличная сходимость на моделях до 10 скважин	Длительность расчета
Простота реализации	На более сложных моделях расчет в значительной степени зависит от оптимизатора
	Плохая сходимость на сложных моделях
	Использование VFP-таблиц

Можно взять за основу метода интерференций



# МЕТОД ИНТЕРФЕРЕНЦИЙ

■  $P_{заб_{ipr}} = IPR(P_{пл}, J, q_{СКВ})$  - для источников (скважин)

■  $P_{заб_{vfp}} = VFP(P_y, WCT, GOR, FREQ, q_{СКВ})$  - для элементов сети (трубопроводы, скважины)

■  $P_{сеп} = const$  – для узлов с фиксированным давлением (сепаратор)

■  $\sum_i^n q_i = q_{IN} = q_{OUT}$  - для узлов сети

■  $f = abs(P_{заб_{ipr}} - P_{заб_{vfp}})$  - функция ошибки

$P_{пл}$  - пластовое давление

$J$  – коэффициент продуктивности

$P_y$  - устьевое давление

$WCT$  – обводненность

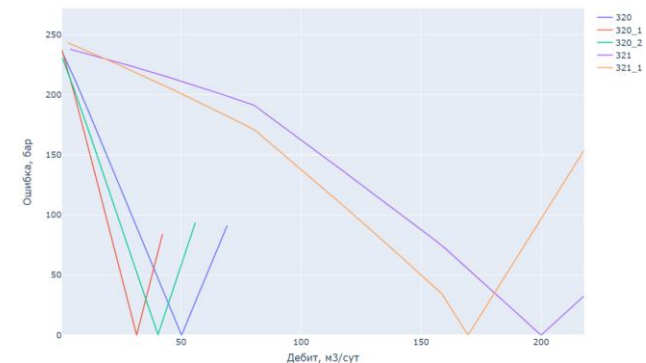
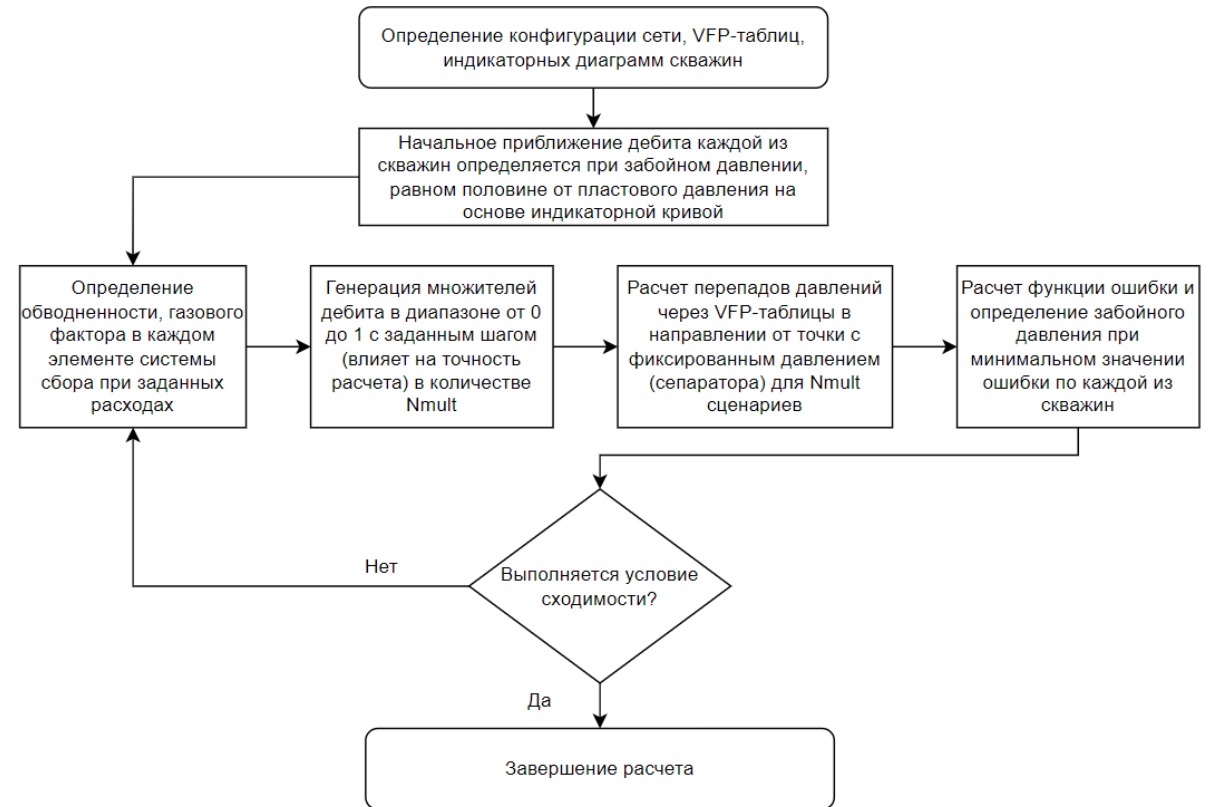
$GOR$  – газовый фактор

$FREQ$  – частота ЭЦН

$q_{IN}$  - суммарный объемный расход на входе в узел

$q_i$  - объемный расход в ветви

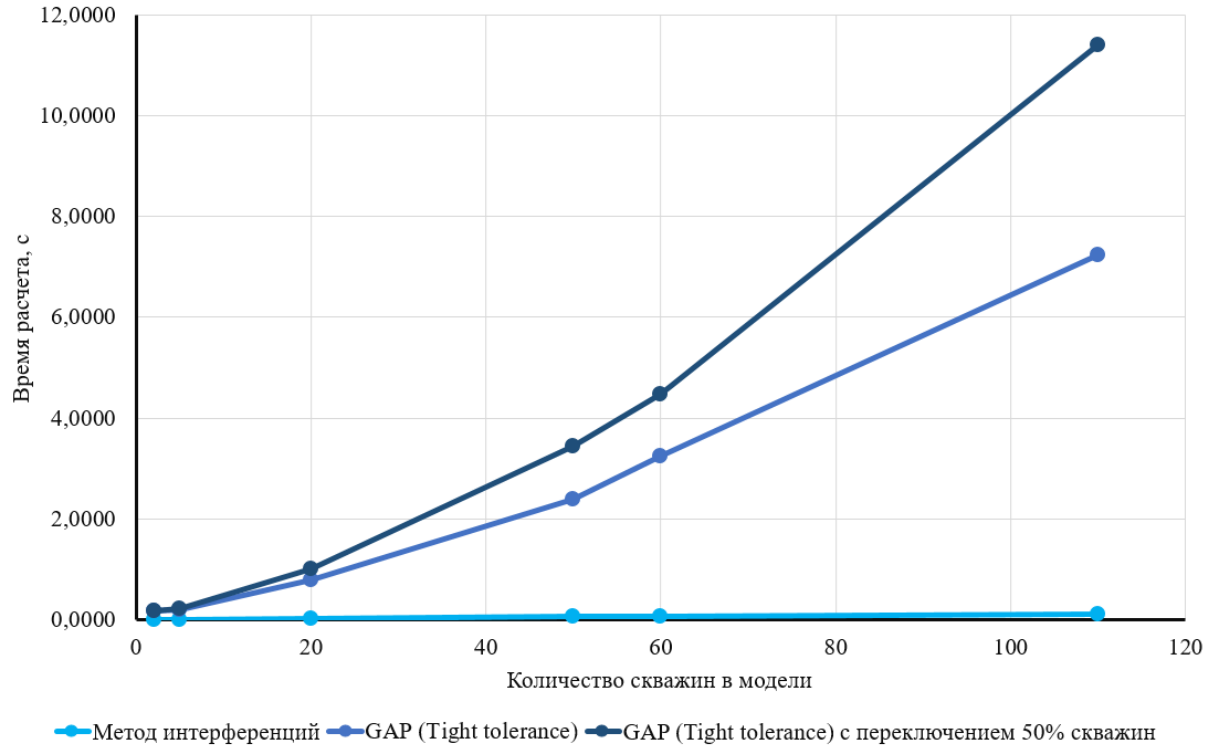
$n$  – количество ветвей, входящих в узел



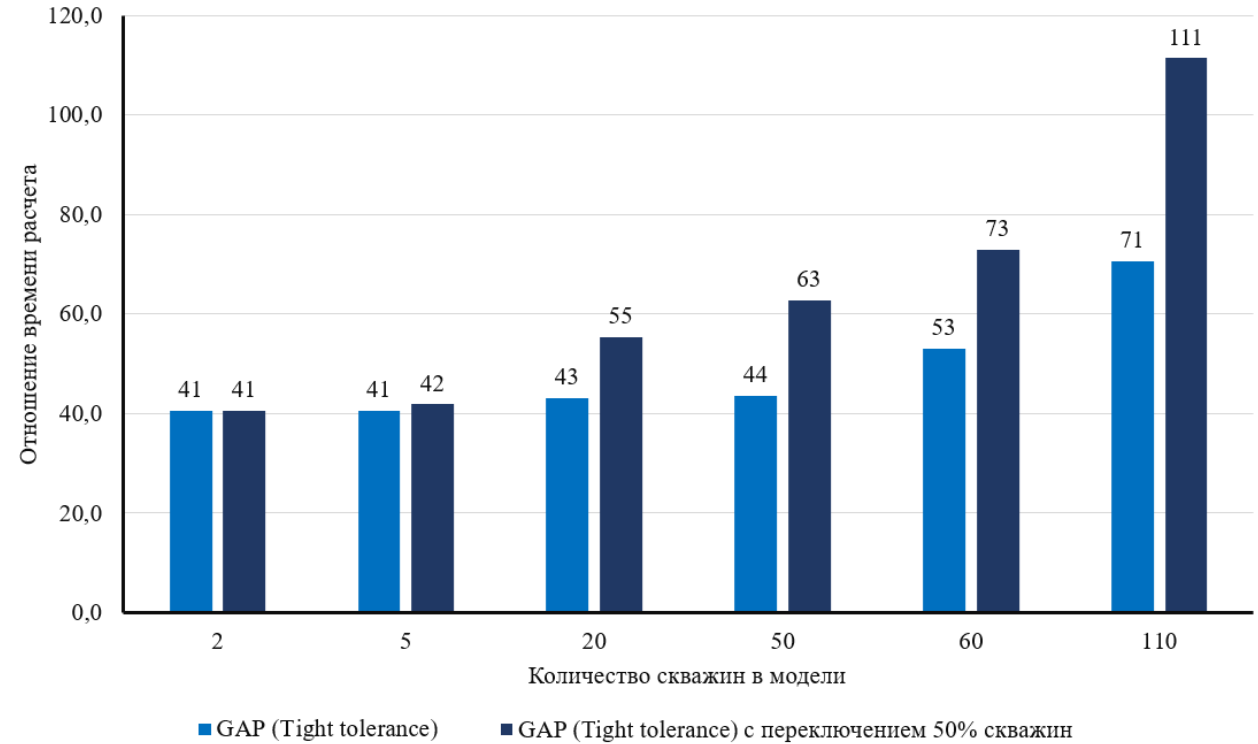
Преимущества	Недостатки
Высокая сходимость на всех тестируемых моделях	Использование VFP-таблиц
Длительность расчета	
Сходимость на моделях сети, по которым отсутствует сходимость по результатам коммерческого симулятора GAP	

# СРАВНЕНИЕ СКОРОСТИ РАСЧЕТОВ

## График скорости расчета



## Ускорение расчета



Ускорение в **71** раз для модели сети из 110 добывающих скважин

Ускорение в **111** раз для модели сети из 110 добывающих скважин с учетом переключения 50% скважин

# ПРИМЕР РАСЧЕТА СЕТИ СБОРА

## Тестовая модель сети сбора в симуляторе GAP

110 скважин с ЭЦН

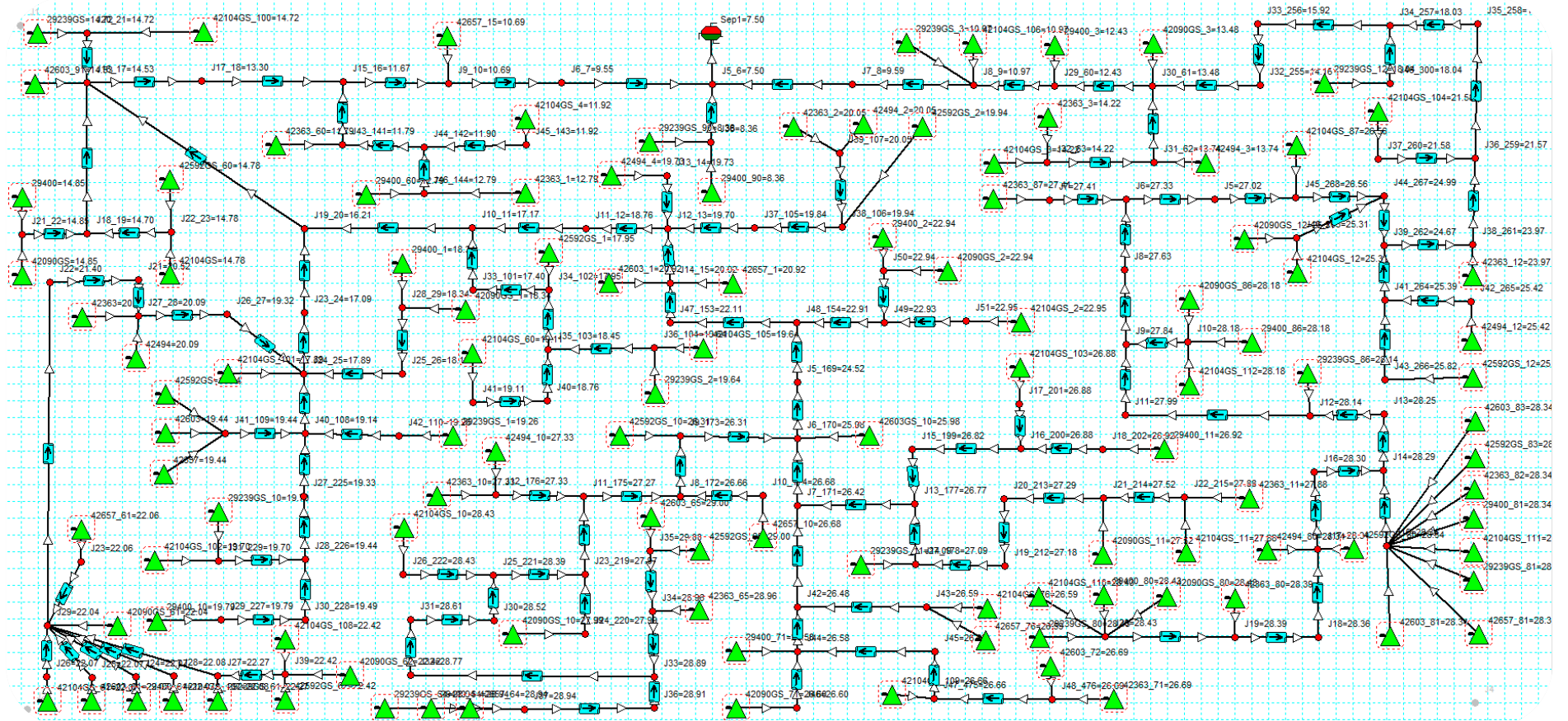


135

трубопроводов

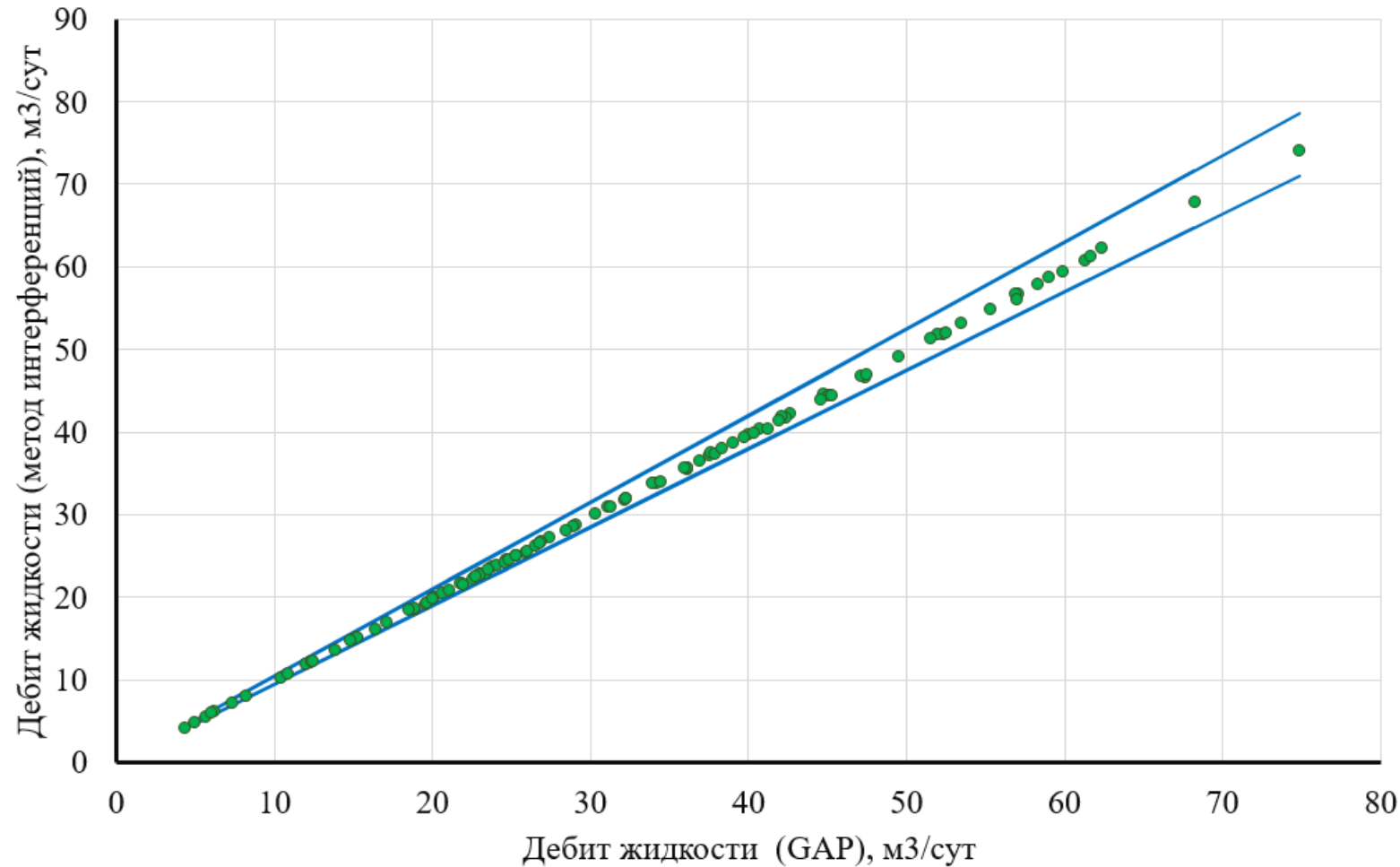


Случайное  
распределение  
параметров скважин



# ПРИМЕР РАСЧЕТА СЕТИ СБОРА

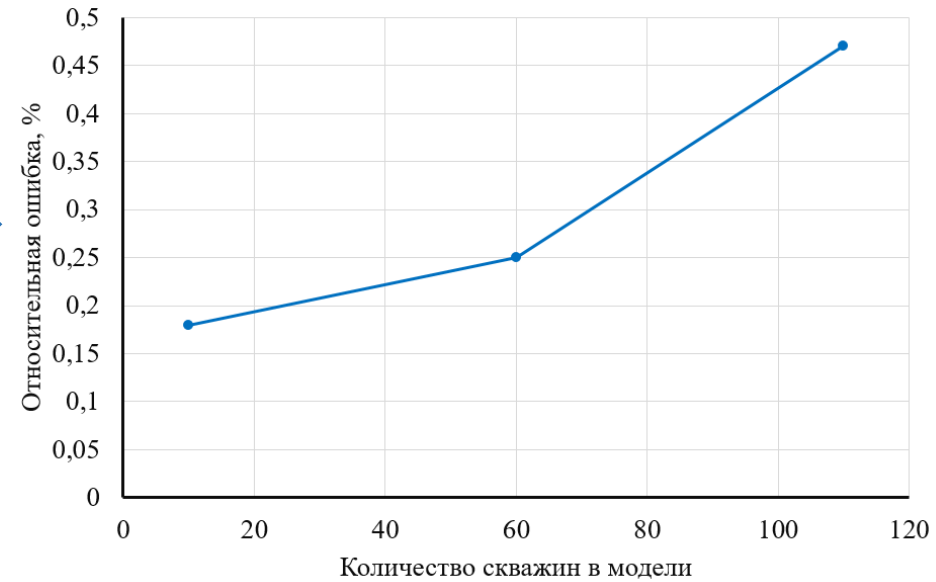
## Кросс-плот дебитов скважин с 5% отклонением



Объемный расход жидкости на сепараторе, м3/сут		Абс. ошибка, м3/сут	Отн. ошибка, %
Метод интерференций	GAP (Default)		
3486,11	3502,63	16,52	0,47

# АНАЛИЗ ОШИБОК РАСЧЕТА

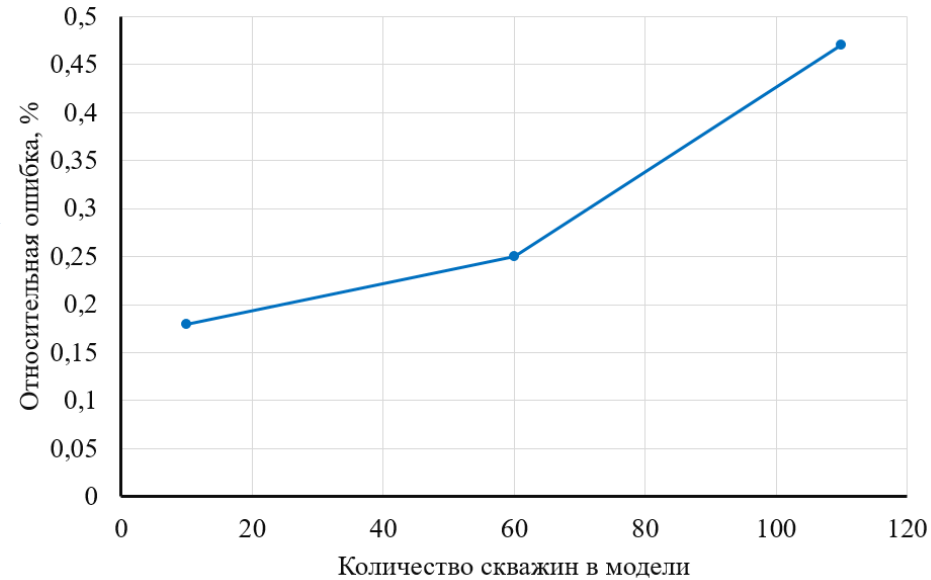
Зависимость ошибки от количества скважин на тестируемых моделях



Зависимость не может быть применена ко всем моделям

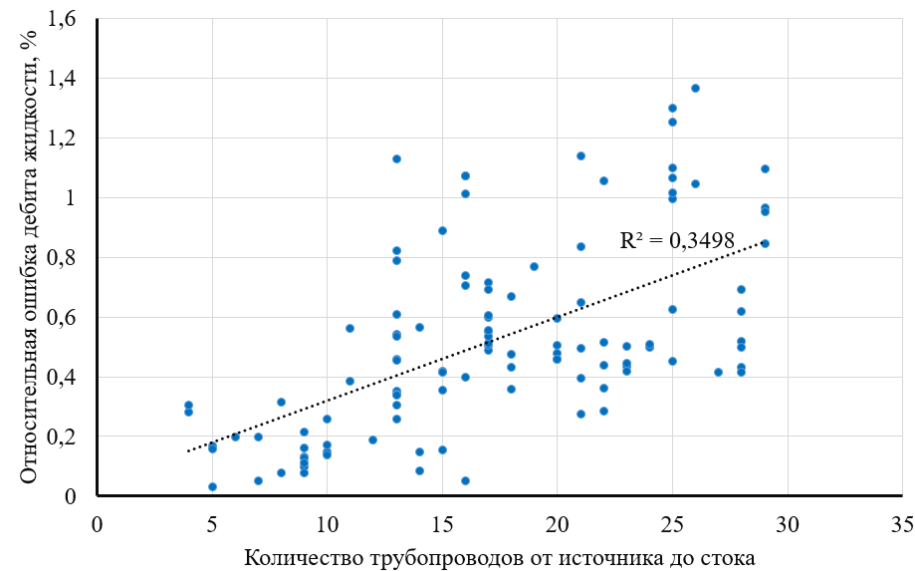
# АНАЛИЗ ОШИБОК РАСЧЕТА

Зависимость ошибки от количества скважин на тестируемых моделях



Зависимость не может быть применена ко всем моделям

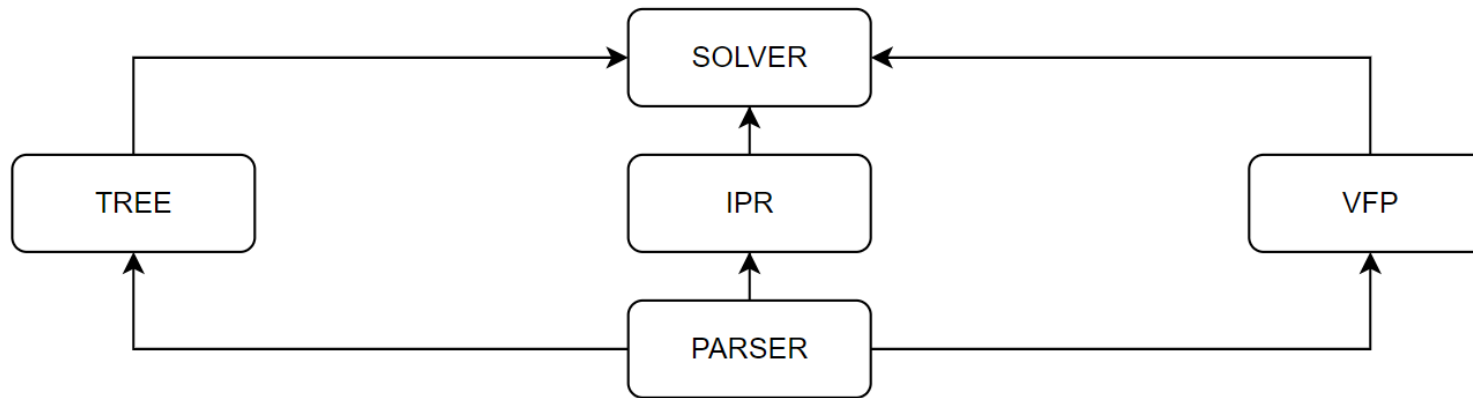
Зависимость ошибки от удаленности скважины




Ошибка растет с увеличением количества трубопроводов

# РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТНОГО МОДУЛЯ

Реализация расчетного модуля на языке программирования PYTHON




**PARSER**




Загрузка конфигурации сети, параметров скважин

**IPR**



Определение моделей индикаторных диаграмм

**VFP**



Парсинг и интерполяция VFP-таблиц

**TREE**



Работа с графом системы сбора

**SOLVER**



Решение системы сбора

# ПОДДЕРЖИВАЕМЫЙ ФУНКЦИОНАЛ

Парсинг исходных данных



Поддержка насосов, компрессоров, объектов с фиксированным перепадом давления в сети

Интерполяция и экстраполяция VFP-таблиц улучшенным алгоритмом



Возможность наличия нескольких точек с фиксированным давлением

Поддержка нескольких моделей индикаторных диаграмм



Изменение статуса источников (включение/выключение)

Расчет сети сбора с источниками с фиксированным дебитом жидкости и скважинами с индикаторной диаграммой



Расчет сети сбора, содержащий лупинги

Преобразование линейного участка сети сбора, состоящего из N VFP-таблиц в эквивалентную VFP-таблицу



Возможность сброса доли воды/газа в узлах сети



# ВЫВОДЫ

---

1

Рассмотрены основы моделирования систем сбора и транспорта нефти и газа

2

Рассмотрены теоретические основы расчета систем сбора

3

Сформулирован упрощенный подход к расчету систем сбора

4

Реализован расчетный модуль систем сбора на языке программирования Python

5

Проанализированы результаты расчета модели системы сбора упрощенным методом

6

Подтверждена возможность ускорения выполнения оптимизационных задач



**ПОЛИТЕХ**

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

[spbstu.ru](http://spbstu.ru)

# Благодарю за внимание!

---

Студент: ВШТМиМФ, группы 5040103/10401

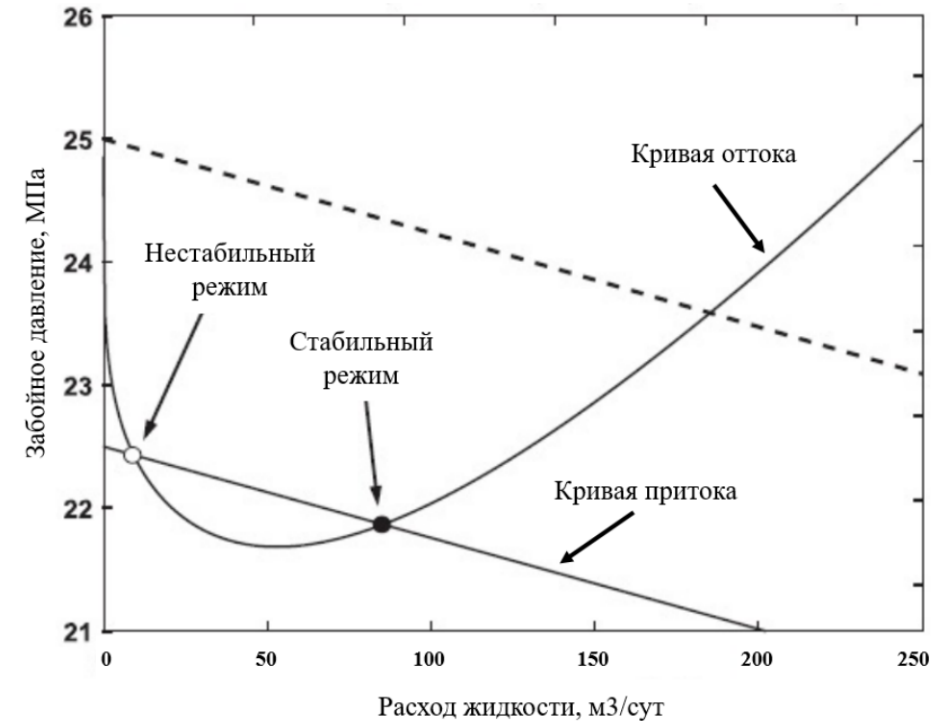
*Бровин Николай Михайлович*

Научный руководитель:

*д.ф.-м.н. , профессор ВШТМиМФ А. В. Порубов*

# Приложение 1. Нестабильный участок VFP-таблицы

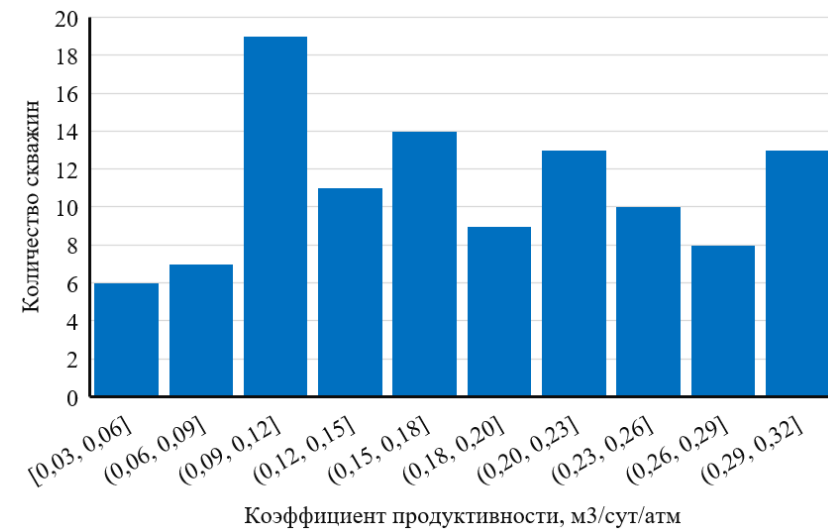
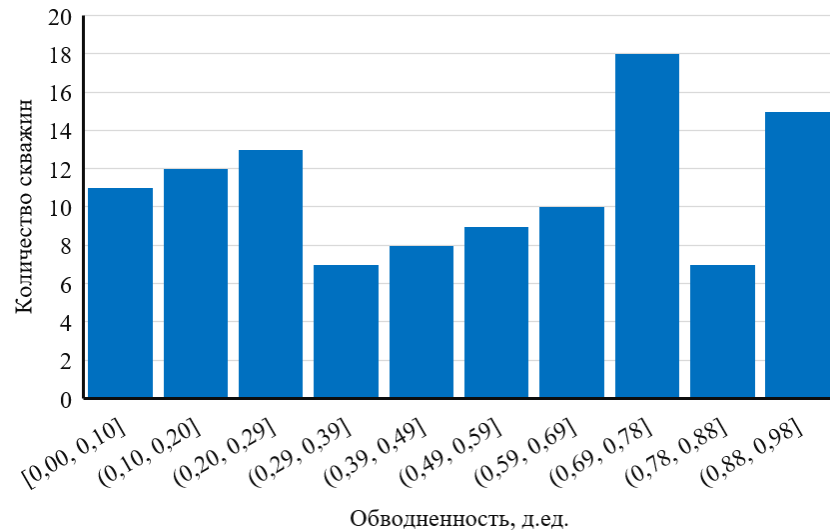
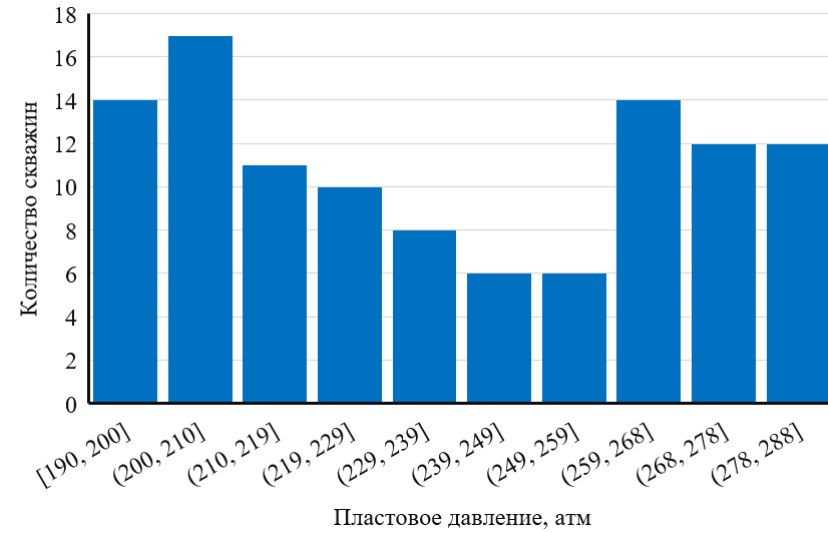
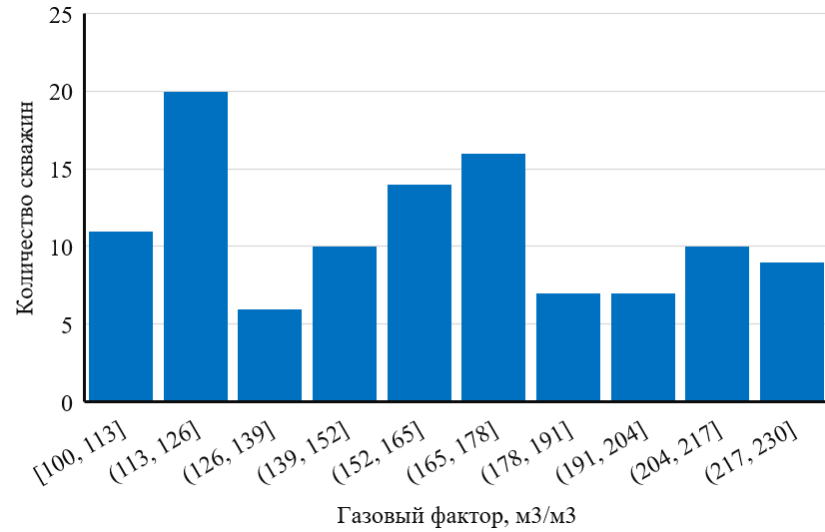
- Состояние системы в рабочей точке:  $P_0 = f_c(q_0)$
- При воздействии возмущения  $\tilde{q}$  вблизи рабочей точки:  $P_0 + \tilde{P} = f_c(q_0 + \tilde{q})$
- Линеаризация:  $f_c = f_c(q_0) + f'_c(q_0) \cdot (q - q_0)$
- Добавляя инерционный член  $i_c \frac{d\tilde{q}}{dt}$ :  $\tilde{P} = f'_{in}\tilde{q} - i_{in} \frac{d\tilde{q}}{dt}$
- При начальных условиях  $t = 0, \tilde{q} = \tilde{q}_0$ :  $\tilde{P} = f'_{out}\tilde{q} + i_{out} \frac{d\tilde{q}}{dt}$
- Решение:  $\frac{d\tilde{q}}{\tilde{q}} = \left( \frac{f'_{in} - f'_{out}}{i_{in} + i_{out}} \right) dt$
- Решение:  $\tilde{q} = \tilde{q}_0 \exp\left( \frac{f'_{in} - f'_{out}}{i_{in} + i_{out}} \cdot t \right)$



Экспоненциальная зависимость амплитуды возмущения от времени. На направление зависимости влияет только знак выражения  $f'_{in} - f'_{out}$ , поскольку  $i_{in} + i_{out} \geq 0$ . Члены  $f'_{in}$  и  $f'_{out}$  – производные (наклон) кривой притока и оттока. С учетом вышесказанного, **только точка пересечения кривой притока с кривой оттока, расположенная правее линии перегиба кривой оттока, представляет собой стабильную рабочую точку**, поскольку выполняется условия для стабильного режима  $f'_{in} - f'_{out} \geq 0$

Как правило, в нефтегазовых скважинах пересечение индикаторной кривой с кривой оттока происходит не более чем в 2-х точках, наличие же 3-ей точки пересечения может свидетельствовать о некорректной кривой оттока.

## Приложение 2. Случайное распределение параметров для кейса из 110 скважин

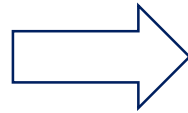


## Приложение 3. Ускорение интерполяции и экстраполяции VFP-таблиц

---

### Решения

- Применение алгоритмов с меньшей сложностью
- Модернизации скрипта экстраполяции VFP-таблиц



### Эффект

- Ускорение процессов экстраполяции и интерполяции VFP-таблиц на 80 % по сравнению с библиотекой SciPy

## Приложение 4. Вклад компонентов VFP-таблицы

$$\frac{dP}{dL} = -(\rho g \sin \theta + \frac{\rho}{2d} f v^2 + \rho v \frac{dv}{dL}),$$

$\frac{dP}{dL}$  – градиент давления;

$\rho$  – плотность жидкости;

$d$  – внутренний диаметр трубопровода;

$\theta$  – угол наклона трубопровода к горизонтали;

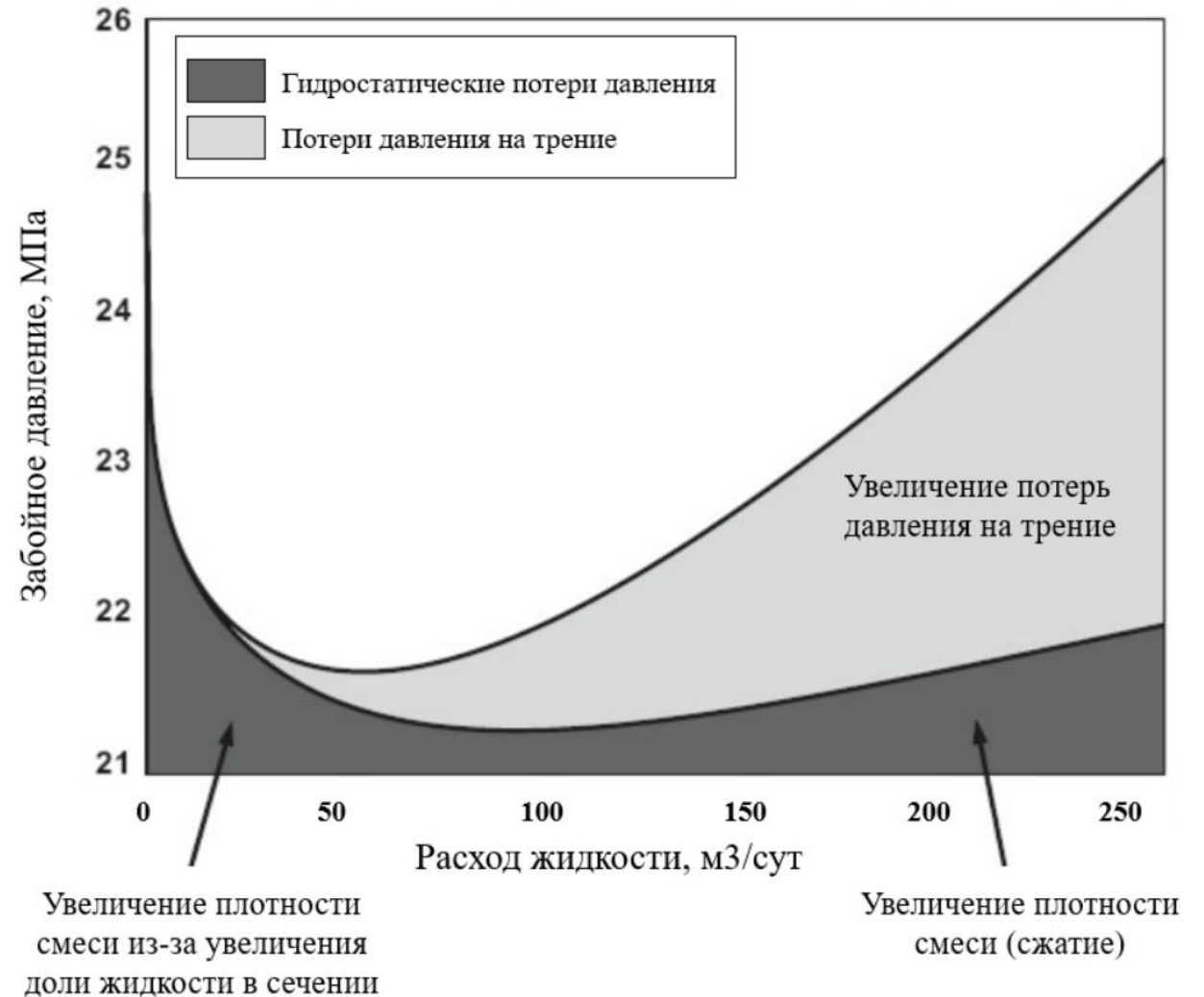
$v$  – скорость потока.

$$dP = dP_H + dP_F + dP_A,$$

где  $dP_H = \rho g L \sin \theta$  - гидростатический перепад давления;

$dP_F = \frac{\rho}{2d} f L v^2$  - перепад давления, вызванный трением;

$dP_A$  – перепад давления, вызванный ускорением потока смеси.

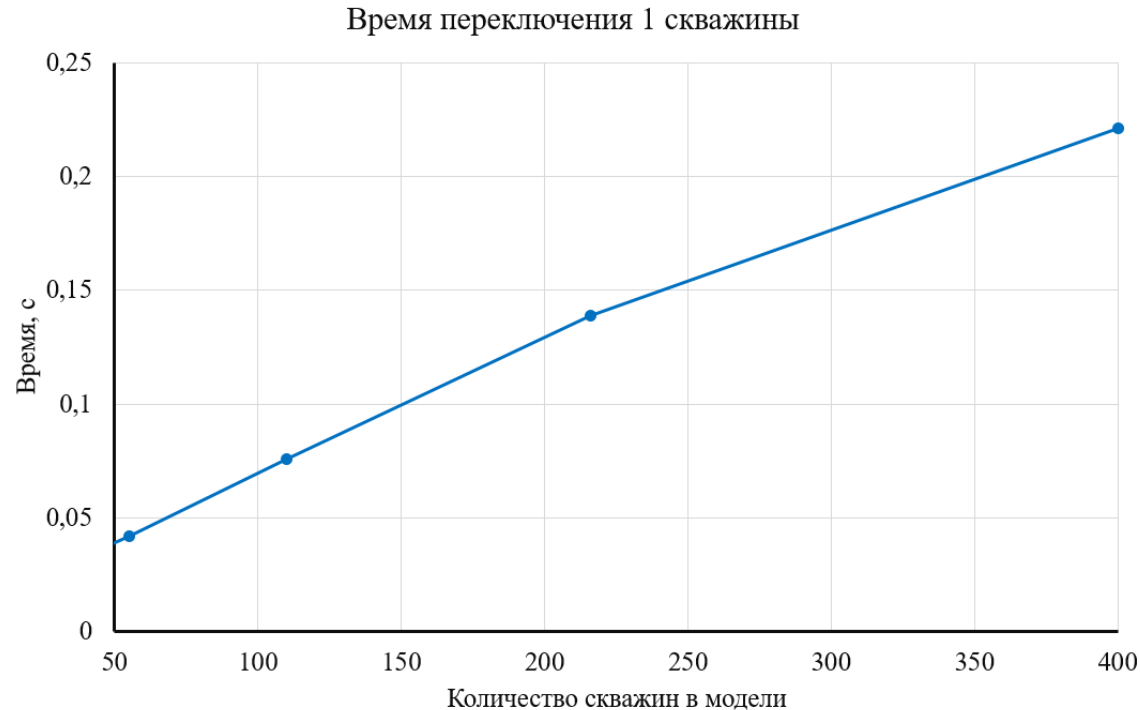


## Приложение 5. Переключение скважин в коммерческих симуляторах

Переключение статуса элементов в сети сбора в симуляторах может значительно увеличивать скорость расчета модели, что особенно сильно сказывается на длительности оптимизационных и многовариантных расчетов

Так, переключение 25 скважин в модели из 100 скважин приводит к дополнительным **2 секундам** к расчету модели, что составляет **30%** от длительности расчета

Кол-во скважин в модели	Среднее время переключения 1 скважины, с
20	0,022
55	0,042
110	0,076
216	0,139
400	0,221



**22,5**  
секунды для  
выключения  
100 скважин в  
модели из 400  
скважин

## Приложение 6. Задача оптимизации нерентабельного фонда

---

Оптимизация нерентабельного фонда – задача определение списка скважин, которые необходимо выключить с экономической точки зрения

**Целевая функция** – свободный денежный поток

**Исходные данные** – модель системы сбора, экономические параметры, характеризующие каждую из скважин

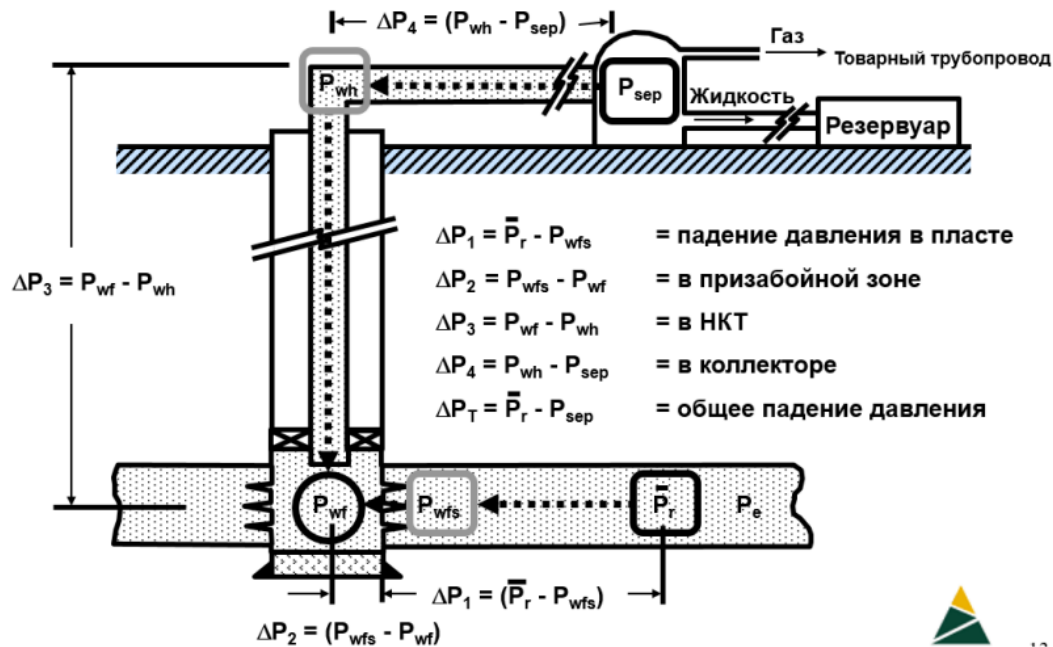
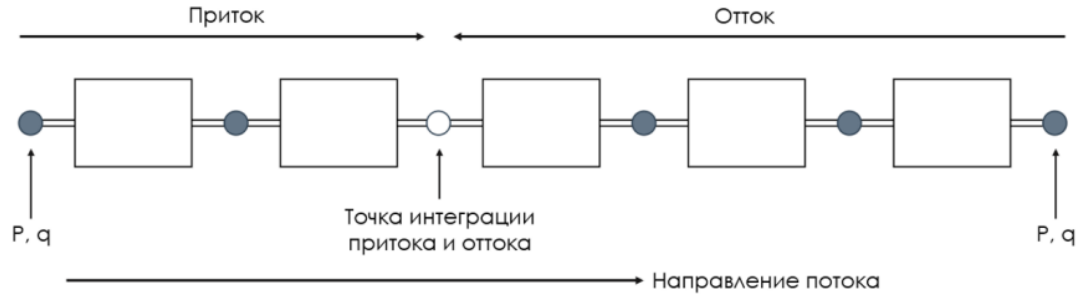
**Алгоритм решения** – оптимизационные расчеты генетическим алгоритмом.

В каждом поколении происходит переключение скважин для определения оптимального вектора включенных скважин. Процесс переключения скважин приводит к значительному увеличению длительности расчета

**Оптимальное решение существует**, поскольку отключение всех скважин не дает максимального значения целевой функции (отсутствие дебита нефти), включение всех скважин также не гарантирует максимальное значение целевой функции из-за интерференции скважин в системе сбора (давление в сети повышается, из-за чего растут забойные давление скважин и снижается дебит нефти)



# Приложение 7. Узловой анализ



## Типичные области применения узлового анализа:

- оценка эффектов снижения пластового давления;
- выбор размеров НКТ, штуцеров и промысловых трубопроводов;
- выбор величины устьевого давления;
- определение ограничений потока;
- определение оптимального способа заканчивания скважины;
- определение оптимального способа механизированной добычи;
- оценка эффектов снижения устьевого давления или установки компрессоров;
- оценка мероприятий по интенсификации притока в скважину.

