

# НАУКА В ПРОЕКТИРОВАНИИ И РАЗРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ – НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ



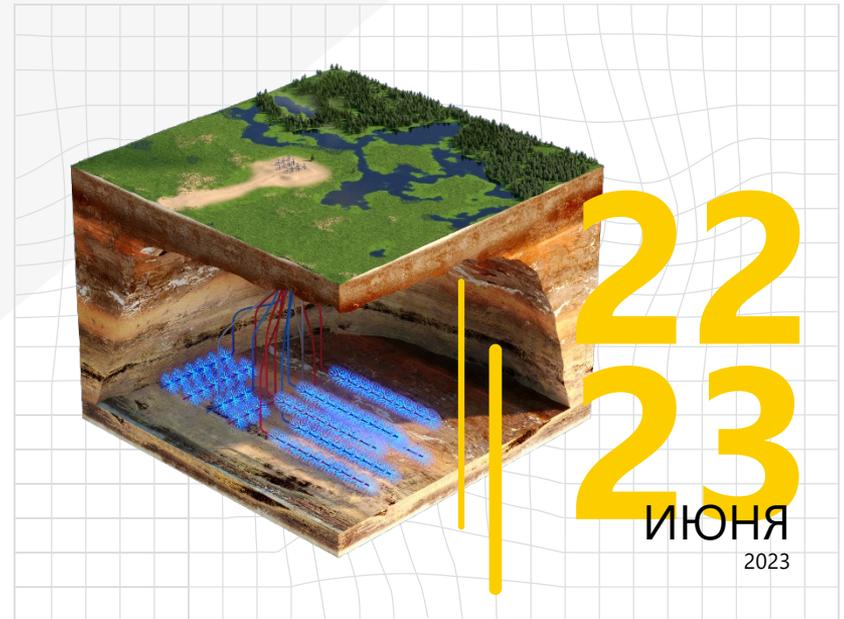
ЕЖЕГОДНАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ



ТЮМЕНЬ

**ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CO<sub>2</sub>  
КАК КЛЮЧЕВАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ  
ПРОЕКТОВ CCUS**

**Д.Г. АФОНИН, А.А. РУЧКИН**  
«Тюменский нефтяной научный центр»





≈ **49\***

МЛН.Т (CO<sub>2</sub>)

**ПРЯМЫЕ И КОСВЕННЫЕ  
ВЫБРОСЫ CO<sub>2</sub>  
В ПЕРИМЕТРЕ  
НК «РОСНЕФТЬ»  
ЗА 2019 ГОД**

\* Источник: Роснефть, отчет ЦИП №237, 2020г  
CCUS - carbon capture, utilization and storage (технология улавливания, использования и хранения диоксида углерода)  
ПНГ – попутный нефтяной газ; CO<sub>2</sub> – углекислый газ



«...в 2020 году уровень рационального использования пнг по компании с учетом развивающихся и новых месторождений, находящихся на ранней стадии разработки, составил 74,8 % ..»

<https://www.rosneft.ru/docs/report/2020/ru/results/>

## ЗАДАЧА

### ИЗ ПРОБЛЕМЫ ИЗВЛЕЧЬ ПОЛЬЗУ:

ПОЛУЧИТЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНУЮ ДОБЫЧУ НЕФТИ И СДЕЛАТЬ ПЕРВЫЕ ШАГИ К СОКРАЩЕНИЮ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

## CCUS

- УЛАВЛИВАНИЕ, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ УГЛЕРОДА

УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА ЗАКАЧКУ CO<sub>2</sub> ДЛЯ  
ВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ ≈  
**229\*- 330 усл.ед./ 1 ТОННА CO<sub>2</sub>**

УТИЛИЗАЦИЯ CO<sub>2</sub>  
ТОЛЬКО ДЛЯ ХРАНЕНИЯ –  
ЭКОНОМИЧЕСКИ

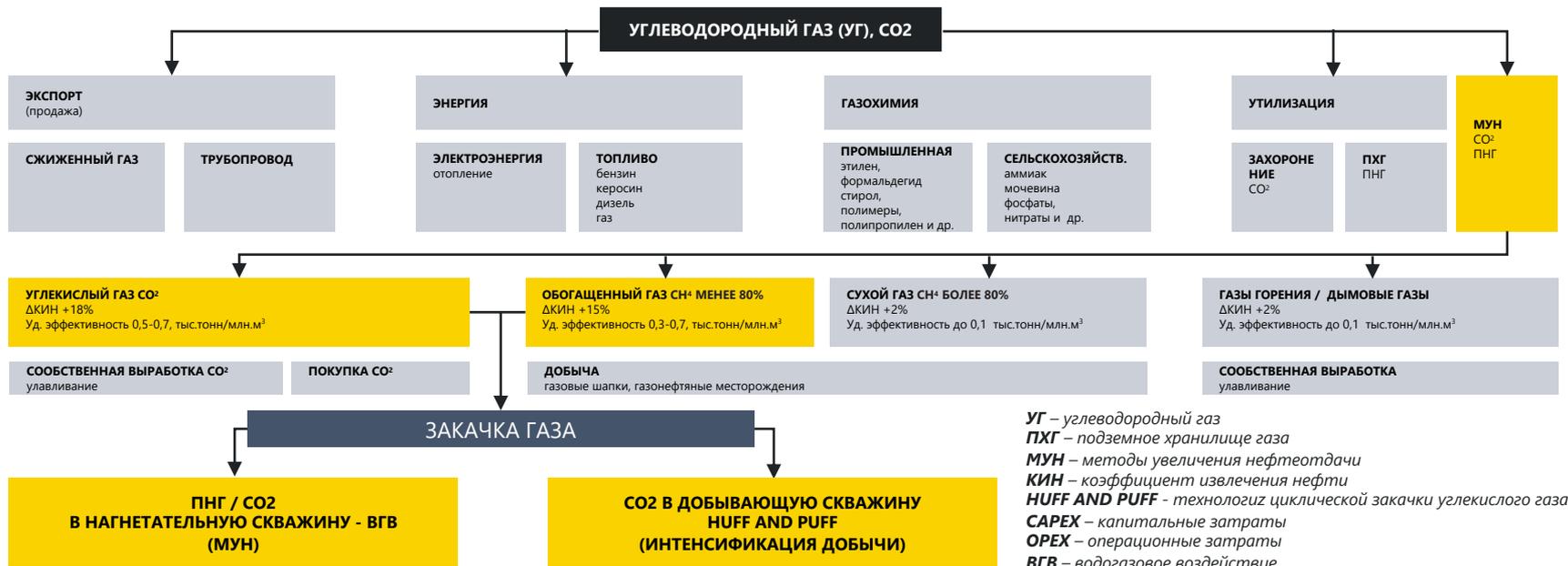
**НЕ ЭФФЕКТИВНА**

МОЖЕМ ЛИ МЫ  
ПОЛУЧИТЬ ВЫГОДУ  
ОТ СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ CO<sub>2</sub>?



*\*Источник: отчет ТомскНИПИнефть «Проработка вариантов технических решений по снижению интенсивности выбросов CO<sub>2</sub> для проекта «Х», 2022*

# КАК ИСПОЛЬЗОВАТЬ ГАЗ?



- увеличение КИН
- частичная утилизация CO<sub>2</sub>



- длительное ожидание эффекта
- большой расход CO<sub>2</sub>
- высокие CAPEX/OPEX
- сложная технология
- коррозия оборудования

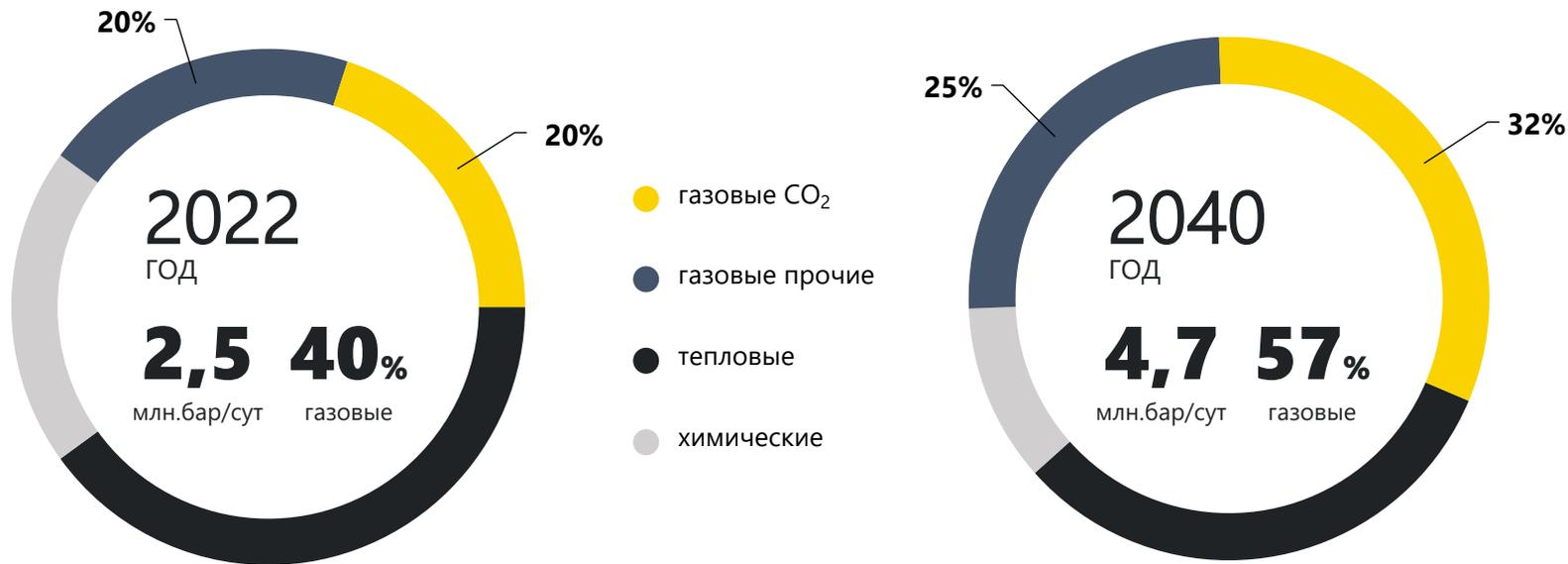


- быстрое получение эффекта
- отсутствие CAPEX
- низкие OPEX



- необходимость приостановки добычи
- недостаточный опыт в РФ

# ПРОГНОЗ МИРОВОЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ ЗА СЧЕТ МУН



\* Источник: Международное энергетическое агентство (МЭА), (база данных по третичным МУН)

**ПЕРЕД ТЕМ, КАК  
ПЕРЕЙТИ К  
ПРАКТИЧЕСКОЙ  
ЗАКАЧКЕ,**

**НЕОБХОДИМО  
ПОЛУЧИТЬ ОТВЕТЫ  
НА ВОПРОСЫ:**

**ЧТО ВЛИЯЕТ НА  
ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ГАЗОВЫХ МЕТОДОВ?**

**1**

**КАК ОПЕРАТИВНО  
ОЦЕНИТЬ ЭФФЕКТ ОТ  
ГАЗОВЫХ МЕТОДОВ?**

**2**

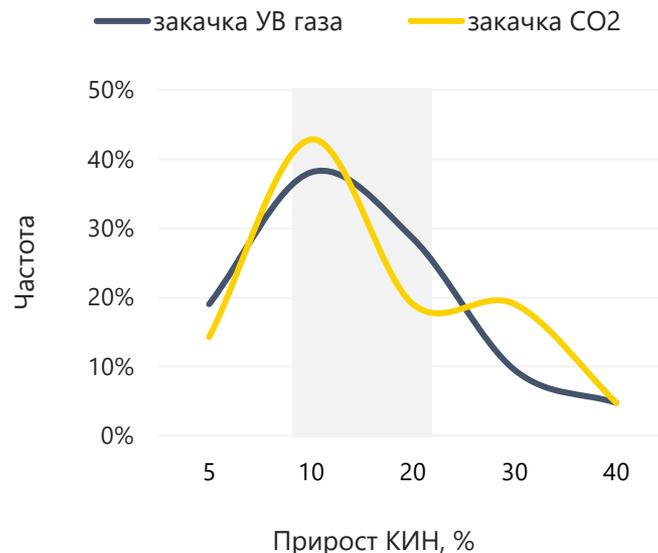
**ЧТО ВАЖНО ИЗУЧИТЬ  
ПЕРЕД РЕАЛИЗАЦИЕЙ  
ГАЗОВЫХ МЕТОДОВ?**

**3**

# ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ\*

ПАРАМЕТР / ГАЗ	УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ (CO <sub>2</sub> )		ЖИРНЫЙ УГЛЕВОДОРОДНЫЙ ГАЗ (CН <sub>4</sub> МЕНЕЕ 80%)	
Неоднородность (коэф-т Дикстра-Парсона)	> 0.6		>0.6	
Минеральный состав пласта	Песчаники, карбонаты, доломиты		Песчаники, карбонаты, доломиты	
Глубина, м	>1000		>2200	
Пластовое давление (P), температура (T), состав нефти (C)	P - >80 ат T - не критично C - высокий процент фракций C5-C12		P - не критично T - не критично C - высокий процент фракций C2-C7	
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup>	800-930		760-900	
Вязкость нефти, сПз	0.1-100		0.1-50	
Текущая нефтенасыщенность	>0.3		>0.3	
Проницаемость, мД	>1		1,5 - 2700	
Режим взаимодействия газов с пластовой нефтью: смешивающееся / несмешивающееся вытеснение	смеш	несмеш	смеш	несмеш
Диапазон прироста КИН по сравнению с заводнением, %	7 - 19	5 - 13	8 - 18	6 - 13
Средний прирост КИН по сравнению с заводнением, %	18	10	15	8
Удельная эффективность метода, тыс.тонн/млн.м <sup>3</sup>	0.5-0.7	0.45	0.3-0.7	0.3-0.45

## Распределение прироста КИН от ВГВ (факт)



\* На основе анализа более 150 ед. литературных источников

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

**Давление Рпл/Рмдс**  
(режим вытеснения)

0-0,6 (несмешивающаяся)

0,6-0,99 (частично смеш.)

$\geq 1$  (смешивающаяся)

**1**  
уровень

**Распределение проницаемости по разрезу**  
(вертикальный тренд изменения проницаемости пропластков)

Увеличение к кровле 

Увеличение к подошве 

Равномерное 

Неравномерное 

**2**  
уровень

**Степень неоднородности проницаемости по разрезу**  
(соотношение проницаемости высоко/низко проницаемых пропластков)

1; 2; 5; 10; 25; 50

**3**  
уровень

**Геолого-технологические параметры**  
(обводненность, анизотропия, относительная подвижность воды)

Обводненность  
(0; 25; 50; 75; 95)

Анизотропия Kz/Kx  
(0; 0,005; 0,05; 0,1; 1)

Относительная проницаемость по воде при остаточной нефти  
(0,034; 0,34; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7)

**4**  
уровень

В исследованиях варьировались следующие параметры: давление смеси, распределение проницаемости по разрезу, степень неоднородности по проницаемости (соотношение высоко- и низкопроницаемых пропластков), анизотропия, остаточная водонасыщенность при остаточной нефтенасыщенности, текущая обводненность продукции. **Общее количество расчетных сценариев составило 860 единиц.**

Рмдс – минимальное давление смеси, Рпл – пластовое давление

# 1 ПОЛУЧЕНЫ УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ (ФОРМУЛЫ) ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВЫХ МУН

## ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ (КПР) ПО РАЗРЕЗУ

▀ **УВЕЛИЧЕНИЕ К КРОВЛЕ**

▴ **УВЕЛИЧЕНИЕ К ПОДОШВЕ**

■ **НЕРАВНОМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ**

≡ **МОНОЛИТНОЕ СТРОЕНИЕ, РАВНОМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ**

## УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВЫХ МУН

$$Y = (1.802 - 0.105X_0 + 0.004X_1 - 7.935X_2 - 0.093X_3 + 0.375X_2X_3 + 0.804X_0X_2) * \text{EXP}(1.796P_{\text{пл}}/P_{\text{мдс}})$$

$$Y = (4.076 + 0.008X_0 - 0.006X_1 + 3.975X_2 - 0.836X_3 + 5.848X_2X_3 - 0.657X_0X_2) * \text{EXP}(2.109P_{\text{пл}}/P_{\text{мдс}})$$

$$Y = (2.374 - 0.009X_0 - 0.001X_1 - 13.022X_2 - 0.224X_3 + 29.755X_2X_3 + 0.242X_0X_2) * \text{EXP}(2.201P_{\text{пл}}/P_{\text{мдс}})$$

$$Y = (1.141 - 0.002X_1 - 0.014X_2 + 1.796X_3 - 0.31X_2X_3) * \text{EXP}(1.858P_{\text{пл}}/P_{\text{мдс}})$$

**X0** - степень неоднородности по проницаемости (соотн. высоко/низко), ед.,

**X1** - обводненность, %,

**X2** - вертикальная анизотропия Kz/Kx, д. ед.,

**X3** - относительная фазовая проницаемость по воде при остаточной нефти, д. ед.,

**Pпл** – пластовое давление;

**Pмдс** – минимальное давление смесимости;

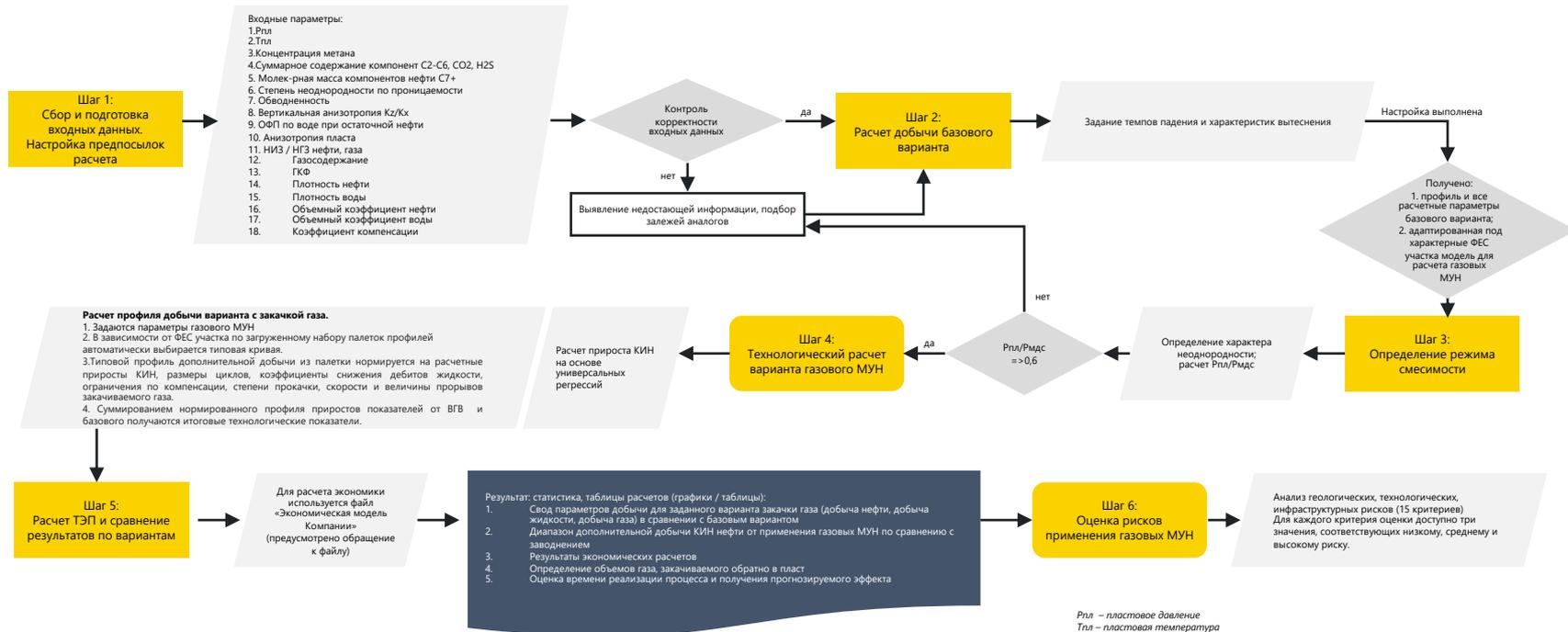
**Y** - прирост добычи от ВГВ в % от НГЗ.

Авторские формулы позволяют определить эффект с минимальной погрешностью всего +/- 2-7%!

Результаты успешно апробированы на 70-ти зарубежных и 10 российских месторождениях

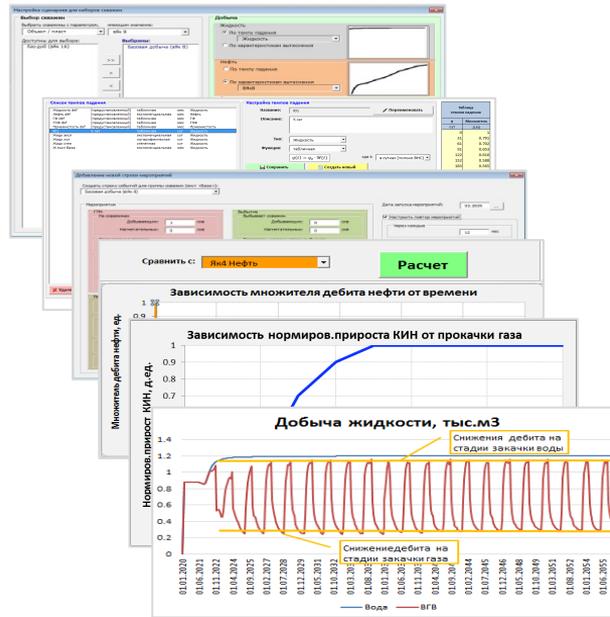
# КАК ВЫБРАТЬ ОБЪЕКТЫ ДЛЯ ЗАКАЧКИ?

## АЛГОРИТМ ПРОТОТИПА ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВГВ



P<sub>пл</sub> – пластовое давление  
 T<sub>пл</sub> – пластовая температура  
 ОФП – остаточная фазовая проницаемость  
 НИЗ – начальные извлекаемые запасы  
 НГЗ – начальные геологические запасы  
 ГФФ – газоконденсатный фактор  
 ФЕС – фильтрационно-емкостные свойства

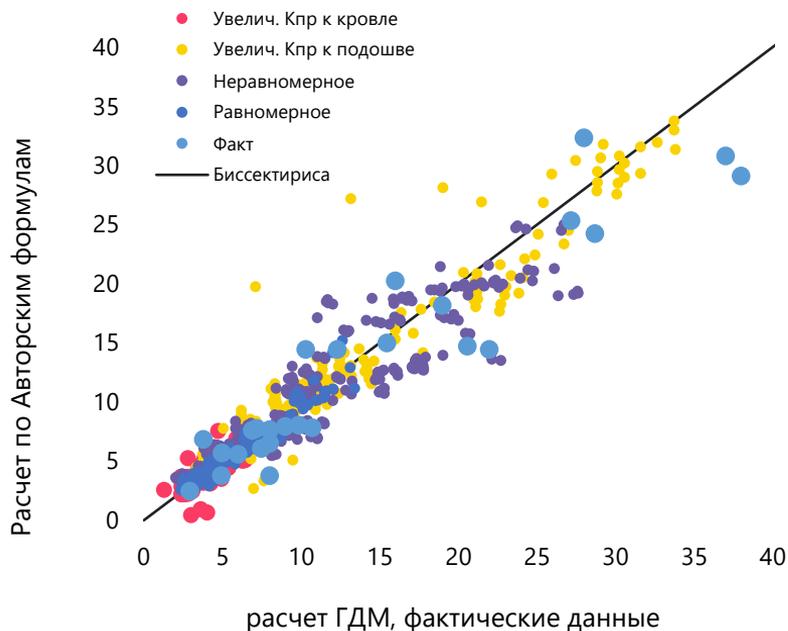
## 2 РЕАЛИЗОВАН ПРОТОТИП НОВОГО ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА «РН-МУН ГАЗ»



«РН-МУН ГАЗ» позволяет выполнить экспертное оперативное определение потенциальной возможности закачки газа на объекте (участке) с минимально необходимым количеством вводных данных, обеспечить на выходе предварительную оценку ТЭО (технико-экономического обоснования)

# ОЦЕНКА КОРРЕКТНОСТИ РАСЧЕТОВ

## КРОСС-ПЛОТ СОПОСТАВЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ\* С РАСЧЕТАМИ ПО КОРРЕЛЯЦИОННЫМ ФОРМУЛАМ



Проведен анализ сопоставления фактических приростов КИН (по данным открытых публикаций) с расчетами по разработанным Авторами корреляционным формулам показал высокую корреляционную сходимость результатов.

\*Использованы материалы в т.ч.:

1. Review of WAG Field Experience J.R. Christensen,\* SPE, and E.H. Stenby, SPE, IVC-SEP, DTU, and A. Skauge, SPE, Norsk Hydro A/S April 2001 SPE Reservoir Evaluation & Engineering 97 "

2. Water alternating gas incremental recovery factor prediction and WAG pilot lessons learned Lazreg Belazreg1 · Syed Mohammad Mahmood Journal of Petroleum Exploration and Production Technology (2020) 10:249–269 <https://doi.org/10.1007/s13202-019-0694-x>

# 3 РАЗРАБОТАНЫ СПЕЦИАЛЬНЫЕ АДРЕСНЫЕ ПРОГРАММЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ПЕРВООЧЕРЕДНЫХ ОБЪЕКТОВ

ЭТАПЫ РАБОТЫ	МЕСЯЦ																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>ПРЕДПРОЕКТНАЯ ПРОРАБОТКА</b>																		
Определение геол.условий для потоковых экспериментов	■																	
Определение терм. условий проведения экспериментов	■																	
Определение состава газа вытеснения	■																	
Определение состава и свойств пластовой нефти	■	■																
<b>ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СМЕСИМОСТИ НЕФТИ И ГАЗА В ОТКРЫТОМ ОБЪЕМЕ</b>																		
Отбор и транспортировка устьевых проб	■	■																
Рекомбинация проб нефти и газа			■															
Swell - test				■	■	■	■	■										
VIT - test							■	■	■									
Slimtube - test				■	■	■	■	■	■									
<b>ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВЫТЕСНЕНИЯ НА КЕРНОВЫХ МОДЕЛЯХ</b>																		
Ревизия и изготовление образцов керна		■	■															
Оценка ОФП в системе Н-В								■	■	■								
Оценка ОФП в системе Н-Г										■	■	■						
Оценка Квыт при вытеснении водой с довытеснением оторочками газа и воды											■	■	■	■				
Оценка Квыт при вытеснении газом с довытеснением оторочками воды и газа															■	■	■	■

Реализация программ рассматривается как первый шаг к активному внедрению газовых МУН в Компании

## 1 этап НИР

- Разработка алгоритмов экспресс оценки эффективности газовых методов
- Подбор кандидатов для закачки газа
- Разработка программы лабораторных исследований

# ШАГИ ПО ПРОЕКТУ

## 2 этап НИОКР

- Обоснование участков ОПР для закачки CO<sub>2</sub>
- Проведение лабораторных исследований
- Адаптация модели на лабораторные данные
- Формирование технологии для ОПР
- Оценка ТЭП

## 3 этап ОПР

- Практическое подтверждение эффективности закачки CO<sub>2</sub>
- Адаптация технологии
- Изучение влияния объемов закачек и давлений нагнетания
- Оценка и настройка модели для перспектив масштабирования
- Оценка влияния коррозии
- Подтверждение результатов ТЭП

## 4 этап ТИРАЖИРОВАНИЕ

- Тиражирование технологий на объекты Компании
- Сокращение выбросов
- Получение дополнительной добычи нефти

# ПОТЕНЦИАЛ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ДОБЫЧИ

**+238** млн. т при попутном захоронении  
 ≈ **270** млн. т CO<sub>2</sub>

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВГВ

**+1580** усл.ед./т закаченного CO<sub>2</sub>

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЕКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ

**-330** усл.ед./т утилизированного CO<sub>2</sub>



**ТОП10**

объектов  
 Роснефть  
 для закачки  
 CO<sub>2</sub>

**1** Проекты ВГВ (МУН) помимо технологической эффективности обеспечивают попутное захоронение до 50% закаченного CO<sub>2</sub>

**2** Проекты захоронения и временного хранения имеют отрицательную экономику при отсутствии налоговой мотивации

**3** Закачка CO<sub>2</sub> в добывающие скважины (huff and puff) не позволяет обеспечить значительный объем утилизации, однако может являться предварительным шагом к масштабной закачке в нагнетательный фонд.



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

«Тюменский нефтяной научный центр»



Афонин Денис Геннадьевич



+7 (3452) 529 090



[dgafonin@rosneft.ru](mailto:dgafonin@rosneft.ru)

