

ТЕРМОМЕТРИЯ

с примерами обработки в Gintel-Plog

Термометрия

Термометрия основана на регистрации температуры (градусы Цельсия) в стволе скважины, обычно связанной с продуктивным пластом перфорационными отверстиями или открытым фильтром.

Специальным предметом изучения являются искусственные поля в интервалах пластов, заколонных перетоков и др. при разработке месторождений методами ПГИ.

Применение термометрии:

- определение интервалов притока (закачки) флюида;
- определение заколонных перетоков флюида;
- определение мест негерметичности НКТ и обсадной колонны;
- определение высоты подъема цемента за колонной;
- а также определение высоты трещин ГРП, уровня флюида в скважине, интервалов перфорации после прострела и др.

Моделирование температуры в стволе скважины:

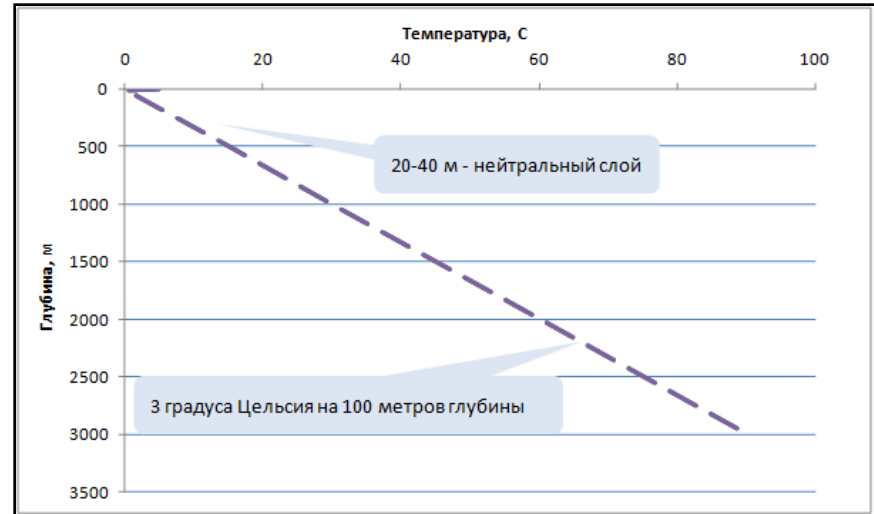
- прогноз образования гидратов в газовых скважинах;
- распределение температуры в нагнетательных скважинах;
- количественное определение дебита флюида;
- и другие.

Температурный градиент

статика

Увеличение температуры на единицу глубины называется *геотермическим градиентом*.

Нейтральным слоем называют слой земли, ниже которого сезонные колебания температуры не имеют влияния.



$T = T_0 + \Gamma \cdot (N - h) / 100$, где Γ – температурный градиент, T_0 – температура нейтрального слоя, h – глубина нейтрального слоя, N – глубина определения температуры

| Район | Глубина, м | Температура, °С | Градиент, °С/100м |
|---------------------------------|------------|-----------------|-------------------|
| Тюменская область | 400-3070 | 13-100 | 3,1 |
| Красноярский край | 820-2560 | 12-60 | 3,0 |
| Томская и Новосибирская области | 1550-4520 | 49-143 | 3,6 |
| Якутия | 660-4080 | 3-95 | 2,3 |
| Иркутская область | 600-2700 | 12-33 | 0,9 |
| Сахалинская область | 120-2420 | 3-89 | 3,1 |

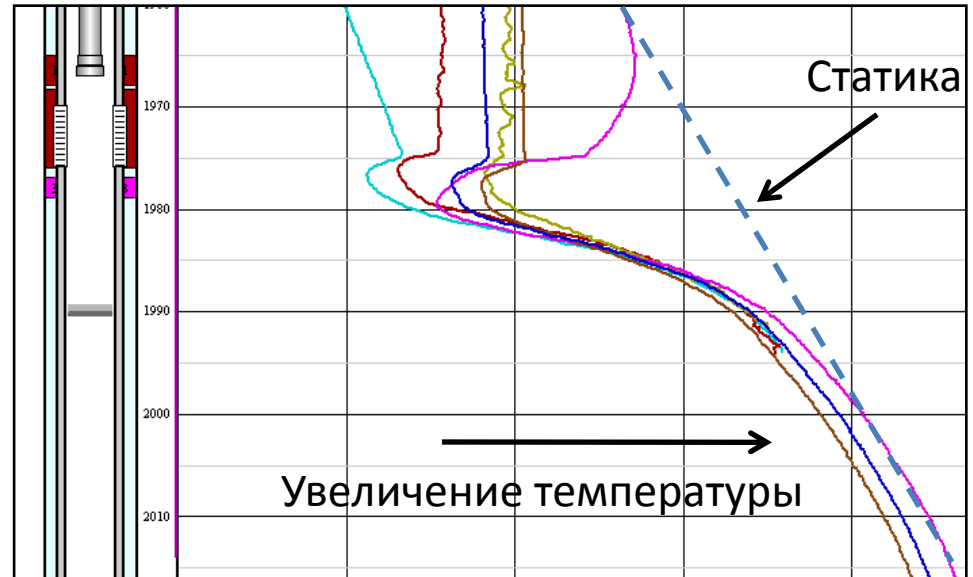
В среднем величина геотермического градиента приблизительно равна 3 °С на 100 м, однако может варьироваться между районами ввиду различной теплопроводности пород и их насыщающих флюидов.

Температурный градиент

динамика

Термограмма в работающей скважине будет отражать все тепловые возмущения связанные с течением флюидов в пласте и скважине.

Со временем после окончания динамических процессов (скважина остановлена) температура в скважине стремится к единому статическому распределению.



Температурная аномалия регистрируется в интервале закачки холодной воды по НКТ. После режима закачки (голубая линия) скважина была остановлена с последующей интервальной по времени регистрацией температуры.

Аппаратура



➤ *Жидкостные термометры*

Принцип - изменение объема жидкости (ртуть, спирт и т.д.)

➤ *Электрические термометры*

Современные приборы регистрируют температуру флюида в скважине путем измерения сопротивления чувствительного элемента, выполненного из платины. Платина - идеальный датчик температуры так как ее сопротивление стабильно и зависит линейно от температуры в широких диапазонах. Таким образом, прибор постоянно регистрирует сопротивление терморезистора, который по калибровочной таблице, соотносится с температурой окружающей среды.

Чувствительный элемент содержится в герметичном корпусе, находящимся в полуоткрытой проточной камере, внутренняя часть которой омывается флюидом.

Современные приборы:

- Температура – до 280 град.С
- Разрешение – 0.003 град.С
- Давление - до 130 МПа
- Скорость каротажа – до 700 м/ч

Коэффициент Джоуля-Томсона

Вследствие адиабатического расширения жидкостей и газов при прохождении через пористые среды и влияния дроссельного процесса наблюдаются термические эффекты. Адиабатическое расширение жидкостей и газов, сопровождающееся понижением температуры, незначительно влияет на температурные изменения внутри пласта и забоев действующих скважин вследствие большой *теплоемкости системы* c_p (горных пород).

Заметные изменения температуры на забоях скважин происходят вследствие дроссельного процесса. При этом интенсивность изменения температуры характеризуется коэффициентом **Джоуля-Томсона**, который представляет собой частную производную от температуры T флюида по давлению p при постоянной энтальпии H . Таким образом к-т Джоуля –Томсона зависит от состава флюида, температуры и давления.

Изменение температуры

$$dT = -\frac{AV}{c_p} \left[1 - \frac{T}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \right] dp$$

Дифференц. к-т Дж-Томсона

$$\varepsilon_I = \frac{AV}{c_p} (1 - \alpha T)$$

Связь к-та Дж-Т. и Адиаб. к-та

$$\varepsilon_I = \frac{AV}{c_p} - \eta_s$$

| Стандартные условия | К-т Дж-Томсона град С/(МПа) | Влияние |
|----------------------------------|-----------------------------|---------|
| Дроссельный эффект | | |
| метан | 2-4.5 | Охл |
| нефть | ~-0.4 | Нагрев |
| вода | -0.22 | нагрев |
| Адиабатическое расширение | | |
| воздух | | охл |
| нефть | | охл |
| вода | | охл |
| | | |

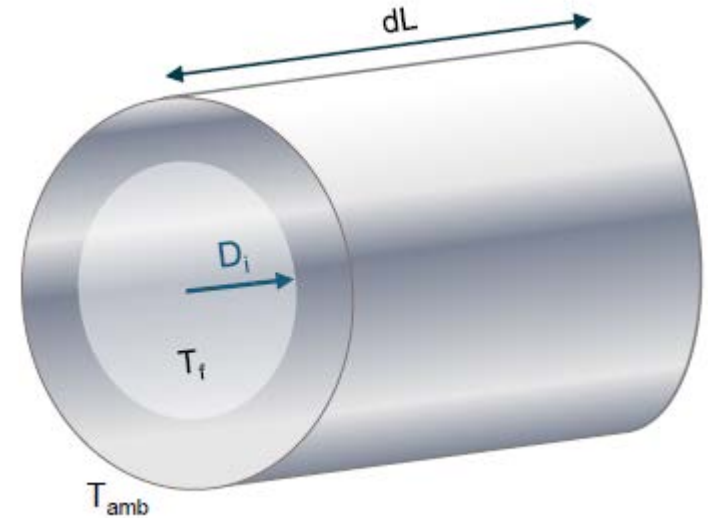
Термодинамические процессы в пористой среде удобно выражать с помощью двух характеристических функций - энтропии и энтальпии. Энтропия (S) как термодинамическая функция, является функцией состояния системы. Изменение энтропии термодинамической системы - $(ds=dQ/T)$ общее количество тепла, приведенное к системе деленное на абсолютную температуру процесса. *Изоэнтальпийный процесс* ($dl=0$) - термодинамический процесс в системе, при котором сохраняется неизменной энтальпия системы, то есть сумма внутренней энергии и произведения давления на объем (например при адиабатических процессах).

Коэффициент теплопередачи (U)

Средний к-т теплопередачи (Дж/сек/м²/К)

зависит от:

- теплопередачи dQ между флюидом и окружающей средой, отданное через поверхность теплообмена на участке длины dL и за время dt ;
- внутреннего диаметра D_i трубы;
- температуры среды T_f ;
- температуры окружающей среды T_{amb} ;



| Флюид | Поверхность теплообмена | Флюид | Средний к-т теплопередачи | |
|--------|--------------------------|------------|-----------------------------|---------------------------|
| | | | (Btu/ft ² hr oF) | (Дж/сек м ² К) |
| Вода | Высокоуглеродистая сталь | Воздух/Газ | 1.4 | 7.9 |
| Вода | Низкоуглеродистая сталь | Воздух/Газ | 2 | 11.3 |
| Вода | Медь | Воздух/Газ | 2.3 | 13.1 |
| Вода | Высокоуглеродистая сталь | Вода | 40 - 50 | 230 - 280 |
| Вода | Низкоуглеродистая сталь | Вода | 60 - 70 | 340 - 400 |
| Вода | Медь | Вода | 60 - 80 | 340 - 455 |
| Воздух | Высокоуглеродистая сталь | Воздух | 1 | 5.7 |
| Воздух | Низкоуглеродистая сталь | Воздух | 1.4 | 7.9 |

Задачи моделирования температуры

Моделирование - современный метод количественной интерпретации термометрии.

Основными задачами при моделировании в стволе скважины:

- прогноз распределения температуры в работающей скважине (**прямая задача**);

Конструкция скважины,
свойства, состав и дебит флюида,
свойства горных пород и др.



Профиль
температуры

- количественная и качественная характеристика флюида в стволе скважины (**обратная задача**);

Конструкция скважины,
Свойства и состав флюида,
свойства горных пород и др.



Профиль
притока

Математическая модель решения прямой задачи является базой решения обратной задачи, поскольку, по сути, решение обратной задачи сводится к последовательному решению серии прямых задач.

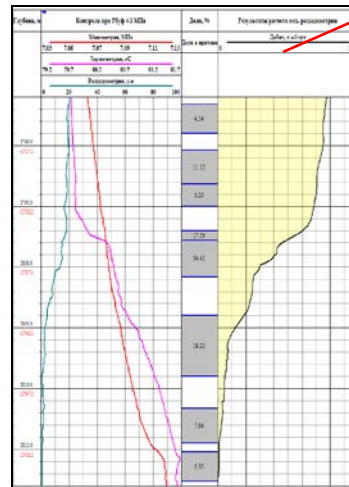
Температурная модель в скважине

Расчет профиля температуры в скважине может быть использован при проектировании конструкции скважины, для предотвращения образования гидратов, анализа промысловых данных при контроле разработки месторождения.

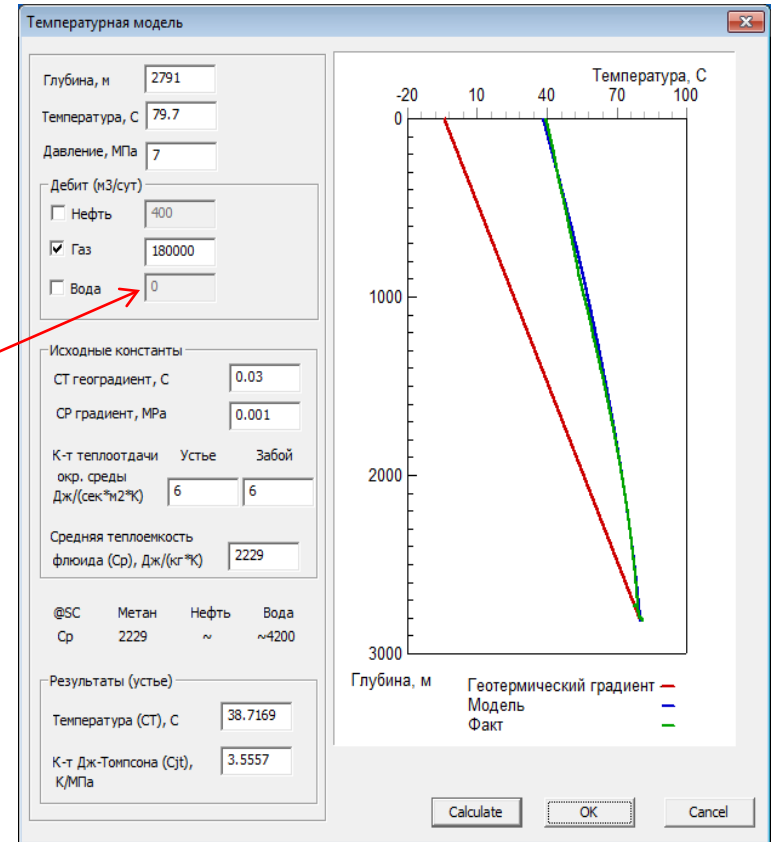
Точное прогнозирование профиля температуры в работающей скважине требует множества исходных данных таких как: интервальный геотермический градиент, дебит, свойства и теплоемкость флюида, коэффициент теплоотдачи окружающей среды и др. Несмотря на то, что эти данные не всегда доступны, накопленный опыт для конкретного месторождения позволяет успешно применять метод моделирования температуры при решении практических задач.

Для прогнозирования температурных полей на установившихся и неустановившихся режимах в используются сложные модели, основанные на применении законов сохранения массы, импульса и энергии.

Сложные модели с расчетом энтальпии на каждой точке, с соответствующей температурой и давлением могут заменяться упрощенными подходами, допуская, что некоторые параметры являются константами. Использование модели «черной нефти» позволяет рассчитывать средние значения двухфазных типов флюида, таких как к-т Джоуля-Томсона (Cjt), теплоемкость флюида (Cp). Однако параметры пластового флюида необходимо вычислять на каждой точке, что существенно увеличивает время расчета. Для этого увеличивают шаг квантования модельной кривой температуры. Так как значения Cjt и Cp в свою очередь зависят от температуры и давления, то необходим и используется итеративный подход к моделированию температурного поля в работающей скважине.



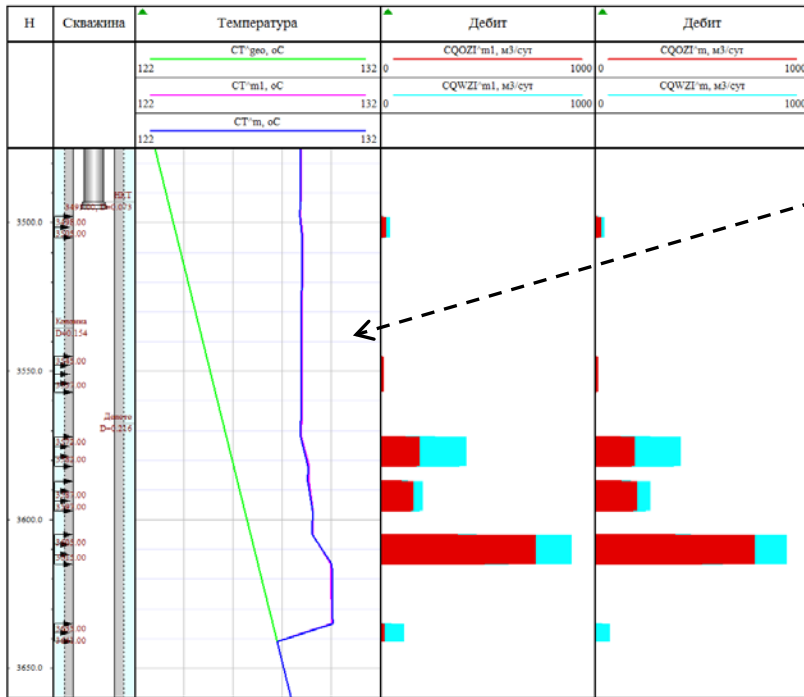
Расходомерия



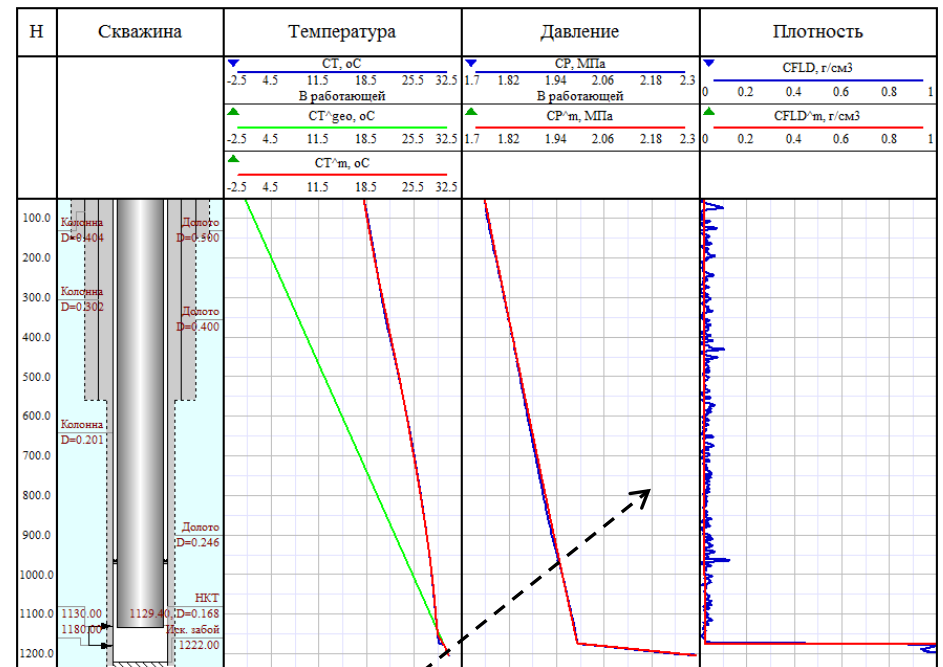
Панель расчета профиля температуры

Пример решения прямой задачи термометрии. Расчет профиля термометрии для газовой скважины пласта показывает хорошую согласованность между фактической и расчетной кривой по температурной модели Plog. Исходный дебит газа 180 т. м3/сут из интервала пласта 2791-2818 м получен по результатам механической расходомерии.

Проблема множества решений обратной задачи



Хорошее совмещение двух различных теоретических двухфазных моделей с одной фактической кривой температуры



РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ:

- комбинирование результатов из различных источников;
- использование некоторых исходных параметров в качестве неизвестной величины;

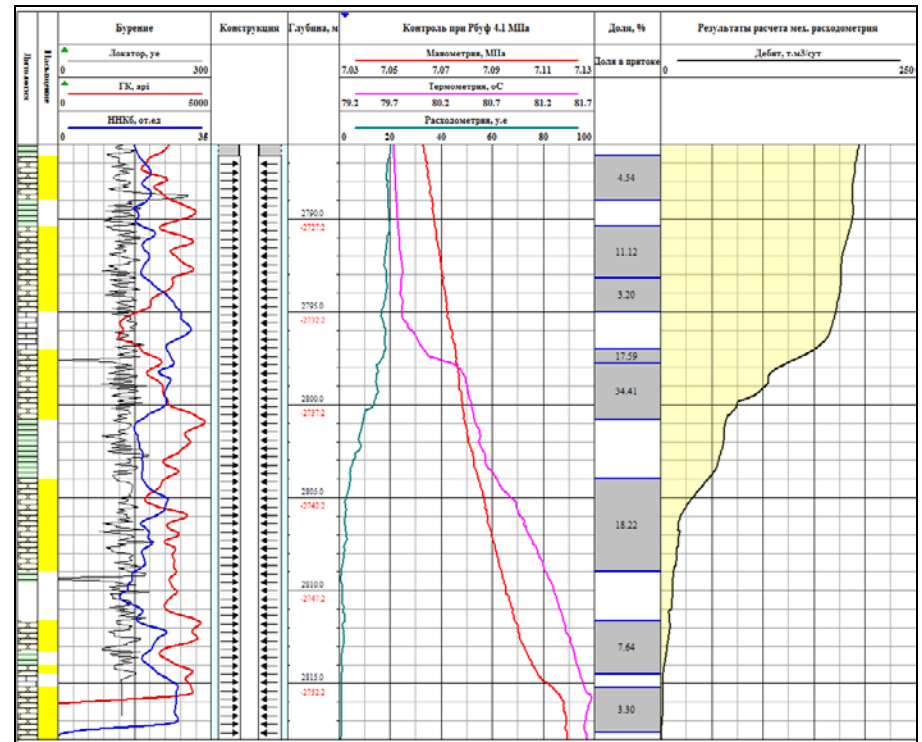
Результаты совмещения теоретических с фактическими кривыми при решении обратной задачи увеличивает достоверность оценки

Интервалы притока

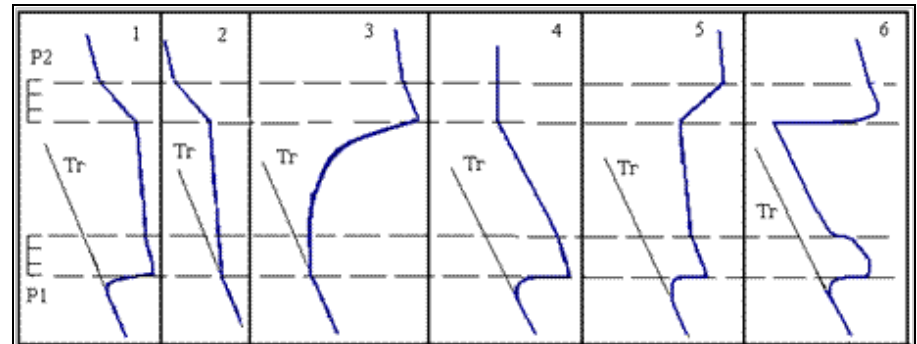
По термометрии интервалы поступления флюида в скважину отмечаются по изменению температуры относительно геотермической за счет *дроссельного эффекта Джоуля-Томсона* и *эффекта калориметрического смешивания*.

Расширение **газа** в интервале притока в стволе скважины сопровождается проявлением дрессельного эффекта - появляется отрицательная аномалия температуры.

Приток **жидкости** из пласта обычно сопровождается нагреванием.



Поступление газа - охлаждение

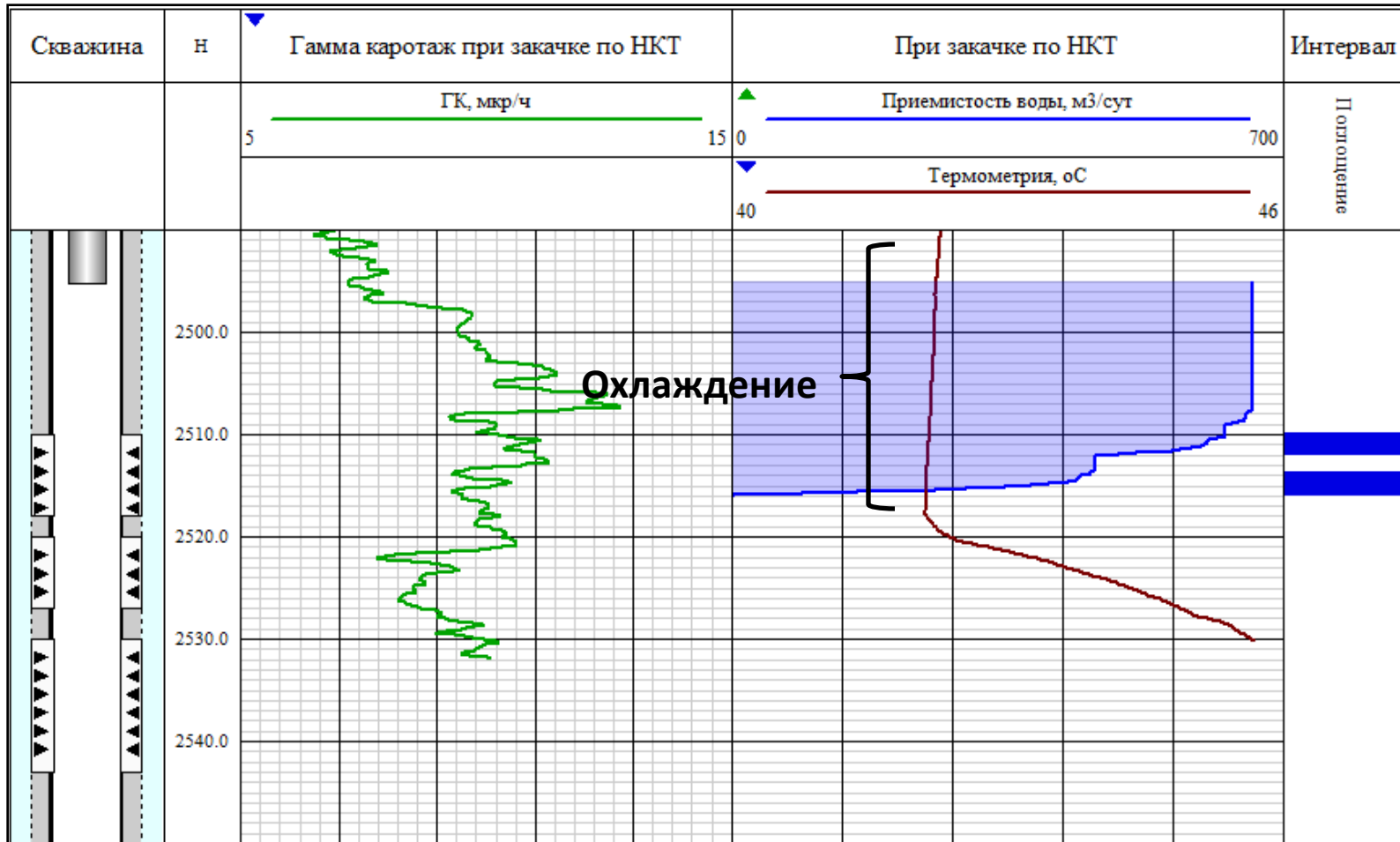


Поступление жидкости - нагревание

ТИПОВЫЕ ТЕРМОГРАММЫ ДЛЯ ДВУХ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ПЛАСТОВ

- 1 - работают оба пласта, против нижнего отмечается дрессельная аномалия, против верхнего - калориметрическое смешивание;
- 2 - работают оба пласта, температура жидкости, поступающей из нижнего, близка к геотермической, против верхнего пласта отмечается калориметрический эффект;
- 3 - плавная затянутость кривой между пластами, в нижнем пласте температура поступающей жидкости близка к геотермической, против верхнего отмечается калориметрическое смешивание;
- 4 - аномалия дресселирования против нижнего пласта, изменение наклона температурной кривой против верхнего;
- 5, 6 - аномалия дресселирования против нижнего пласта, положительная аномалия калориметрического смешивания против верхнего (верхний пласт высоконапорный, давление нижележащего пласта P1 < давления вышележащего пласта P2).

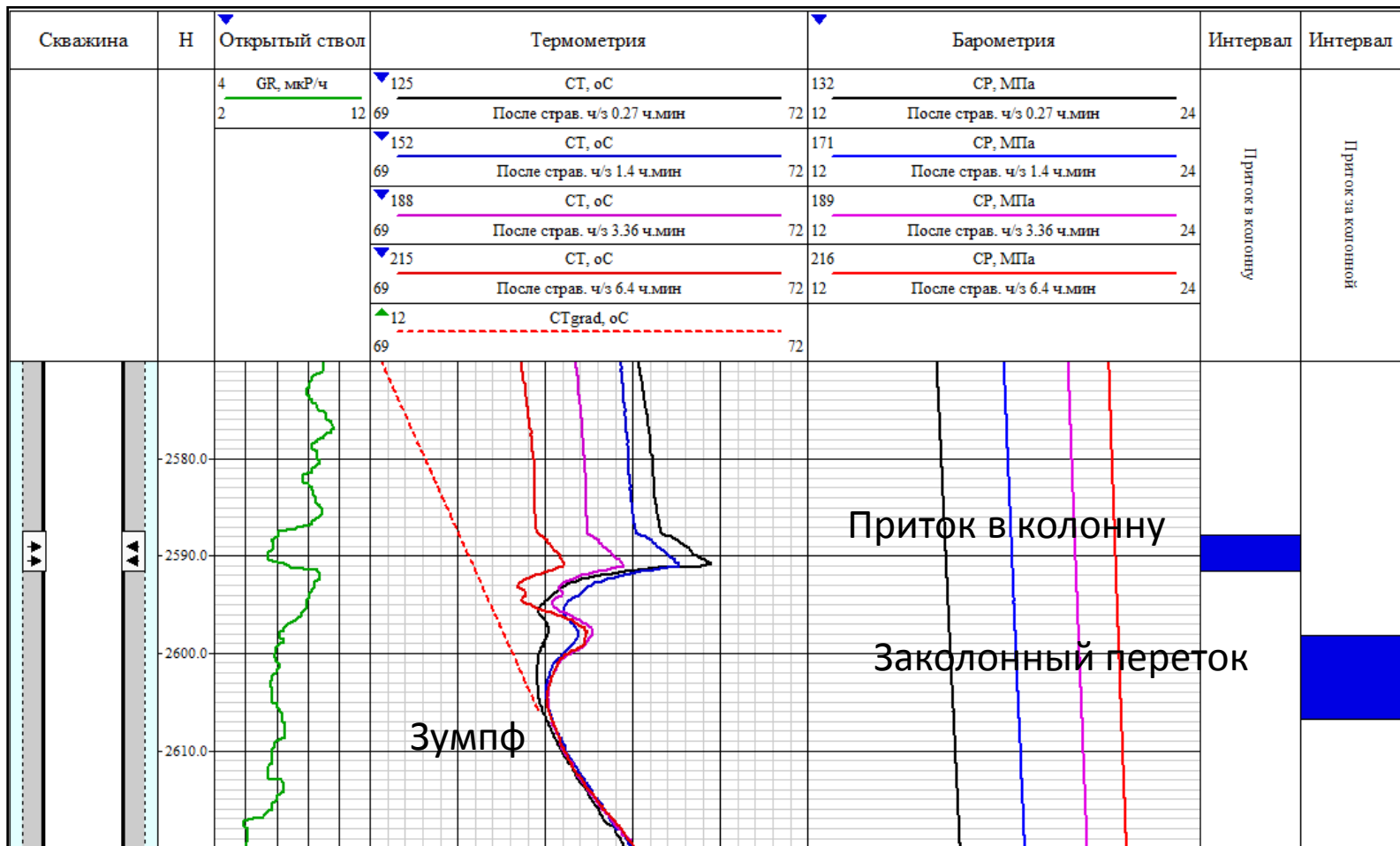
Интервалы закачки



При проведении закачки температура выше интервала приемистости регистрирует излом – происходит охлаждение водой.

Оценка техсостояния скважин

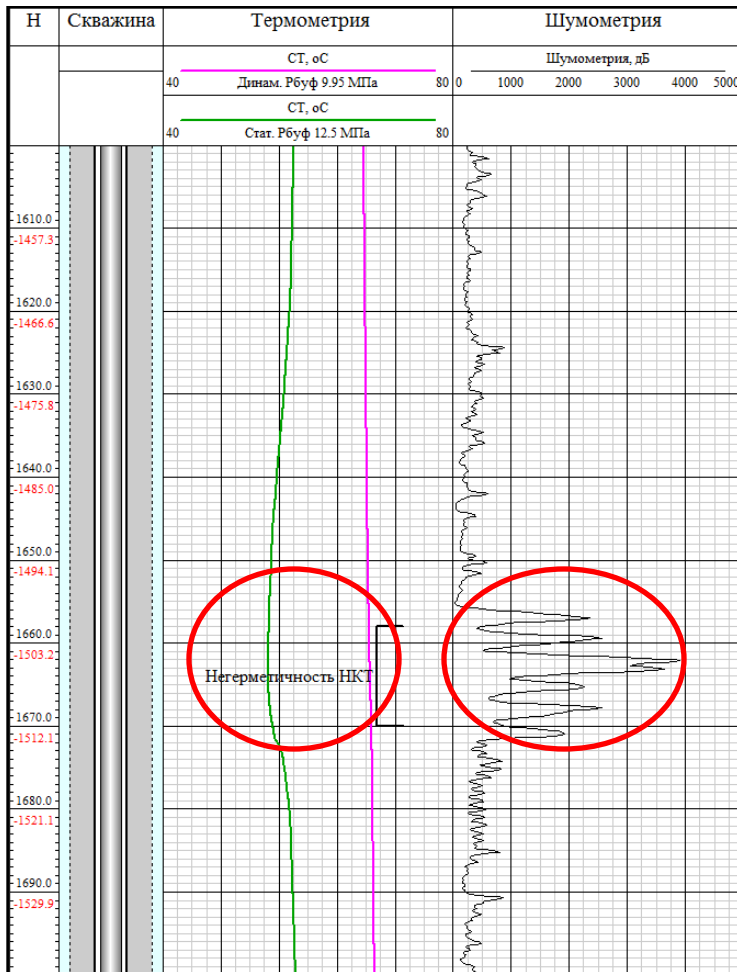
заколонные перетоки



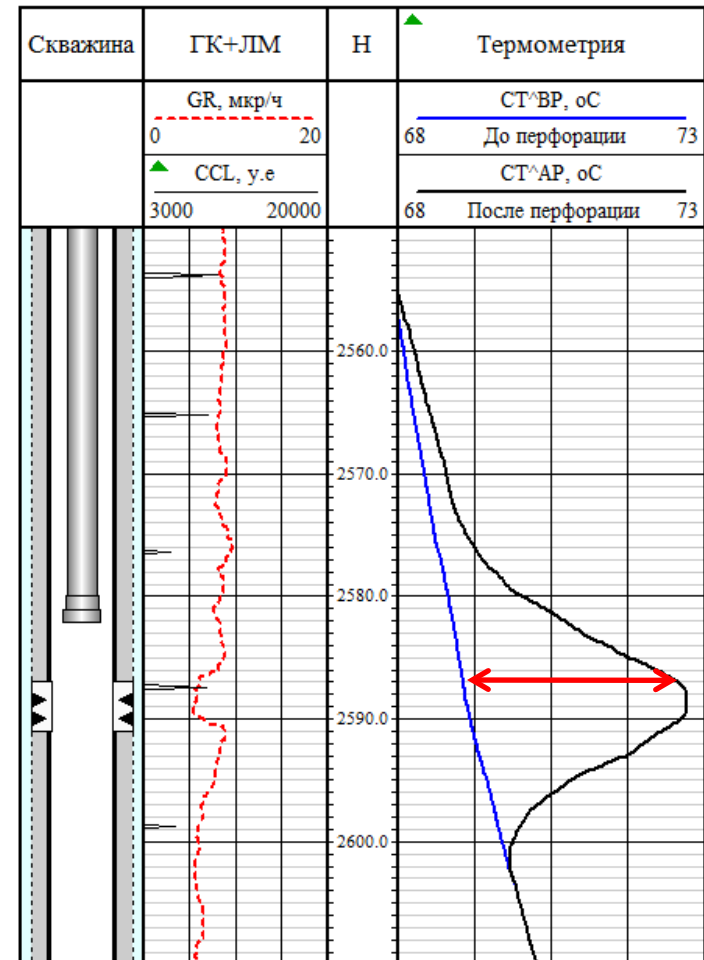
Признаками заколонного перетока снизу являются нарушение геотермического распределения в зумпфе в интервале перетока

Оценка техсостояния скважин

негерметичность НКТ, перфорация



Негерметичность НКТ по термограмме подтверждается показаниями шумомера.



Температурная аномалия образована горением зарядов перфоратора.

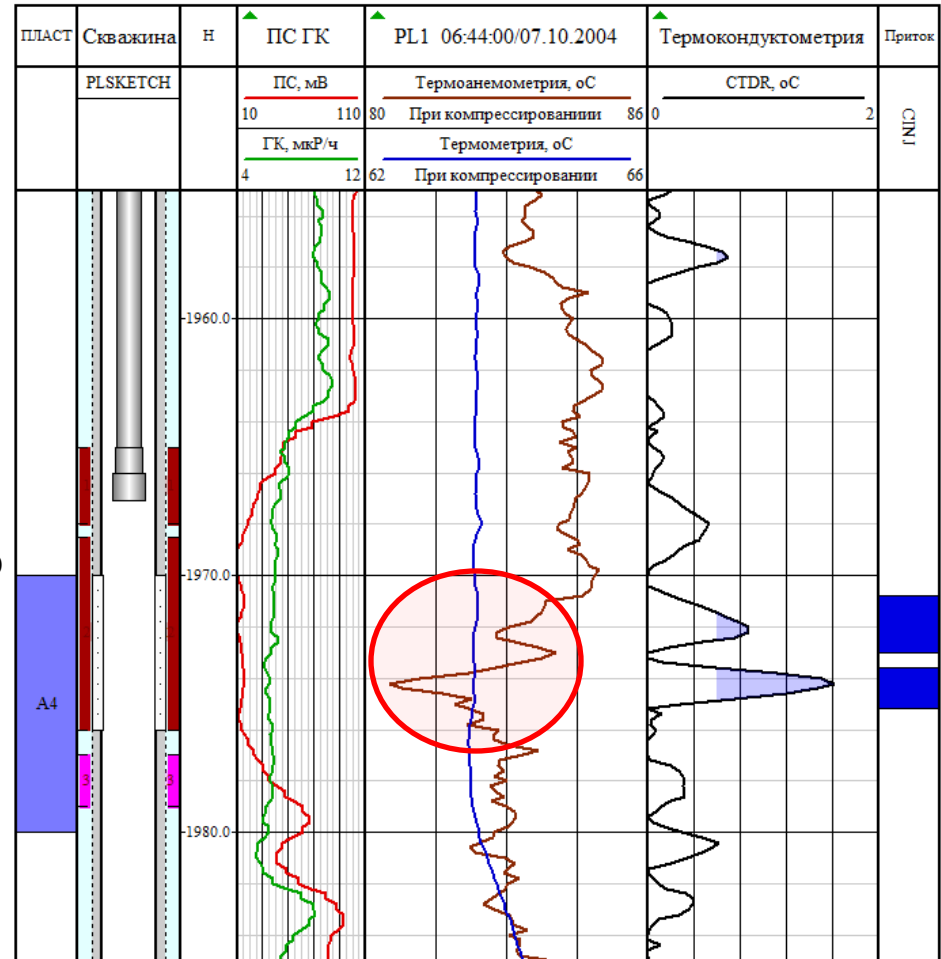
Термокондуктивная расходомертия

разновидность термометрии

Задача: Определение интервалов притока

Принцип работы: Чувствительным элементом термокондуктивных расходомеров является датчик-резистор, нагреваемый электрическим током до температуры, превышающей температуру среды. Восходящий/нисходящий поток флюида охлаждает датчик, изменяя его активное сопротивление.

Преимущество: Повышенная чувствительность в области низких скоростей потока.



Заключение

Преимущества метода термометрии:

- недорогой метод;
- обладает высокой точностью и разрешением;
- позволяет решать широкий спектр задач;
- комбинируется с другими методами.