

# Системный подход к изучению нефтегазоносных пластов

## Петрофизическая оценка.

**Проницаемость. Определение проницаемости Эффективная и абсолютная проницаемость Лабораторные измерения на образцах керна. Эффект проскальзывания газа. Измерения с применением скважинных приборов. Опробование пласта испытателем на кабеле. Измерение проницаемости с помощью ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Гидродинамические испытания**

## Лекция 9

**Казахский Национальный Исследовательский Технический  
Университет,  
Кафедра “Геофизики”**

# Петрофизическая оценка

## 9.1. Комплексирование данных каротажа и керна

При обычных условиях комплексирование данных каротажа и керна для определения водонасыщенности доступны три основных источника информации – это данные экстракции керна, замеры капиллярного давления и интерпретация ГИС.

Каждый из этих источников может давать как достоверную, так и недостоверную информацию в зависимости от целого ряда факторов. Тем не менее, можно выделить несколько общих принципов, применимых в большинстве случаев:

- Первая задача всегда связана с оценкой достоверности всех источников информации, а также количества имеющихся в наличии данных ГИС и керна. Данные капиллярного давления необходимо нормализовать и тщательно привести в соответствие с пластовыми условиями, так чтобы их можно было сравнить с другими доступными данными.
- При наличии данных экстракции в аппарате Дина-Старка, полученных на образцах керна, извлеченных при бурении с применением раствора на нефтяной основе, их следует рассматривать как максимально приближенные к реальным показателям остаточной водонасыщенности пласта. В таких случаях любые другие данные необходимо согласовывать с данными экстракции, полученными выше переходной зоны.
- Результаты интерпретации ГИС всегда необходимо сопоставлять с имеющимися замерами капиллярного давления. Общий профиль водонасыщенности также можно разделить на кривые  $K_v$  от глубины для различных фаций или классов пористости, с тем чтобы облегчить сравнение с подобными группами замеров по керну.
- При наличии непротиворечивых и достоверных данных кернового анализа замеры капиллярного давления следует использовать как эталонную информацию для проверки интерпретации ГИС, особенно в тех случаях, когда существует неопределенность относительно некоторых из переменных, входящих в уравнение Арчи.

# Петрофизическая оценка

- ✓ Когда существует неопределенность относительно достоверности данных капиллярного давления (изменение смачиваемости), предпочтительной является интерпретация ГИС. Кроме того, ГИС представляет собой реальный масштаб пласта, тогда как данные, полученные при анализе образцов керна, основываются на незначительном объеме фактического материала.
- ✓ Данные импульсного нейтронного каротажа всегда необходимо приводить в соответствие с данными ГИС в необсаженном стволе скважины.



**Рис.9.1. Определение водонасыщенности для нефтяного месторождения в Северном море**

## 9.2. Проницаемость

Проницаемость определяется как способность горной породы проводить флюиды.

Без сомнения, она является самым важным петрофизическим свойством пласта. Большая часть параметров, применяемых для расчета затрат по проекту разработки месторождения, так или иначе связана с проницаемостью.

Проницаемость также относится к числу наиболее сложных для определения параметров при изучении коллекторских свойств пласта. Во многих случаях проницаемость представляет собой один из парадоксов традиционных исследований.

Геологи и петрофизики часто используют множество технических ресурсов для моделирования проницаемости.

# Петрофизическая оценка

Однако с другой стороны, инженеры-разработчики часто без колебаний жертвуют результатами такого моделирования в пользу адаптации модели поведения пласта.

Поэтому, когда речь идет о проницаемости, возникают особые сложности с применением концепции интеграции, потому что для этого требуется глубокое понимание всех статических и динамических воздействий этого параметра.

Когда дело касается интеграции, необходимо проводить различия между абсолютной и эффективной проницаемостью, принимать в расчет масштаб и тип измерений, условия окружающей среды, влияющие на данные, и так далее. Перед тем как пытаться получить общую картину, следует прояснить и учесть все эти моменты.

## 9.2.1. Общие положения

Еще в 1956 году, изучая общественные фонтаны в городе Дижон, французский инженер Дарси вывел простое эмпирическое уравнение для расчета расхода воды:

$$Q = KA \frac{\Delta h}{L} \quad (9.1)$$

где  $Q$  - обозначает объем потока воды через трубу, наполненную песком, с площадью поперечного сечения  $A$  и длиной  $L$ , а  $h$  - гидростатический напор.

В своем уравнении Дарси также определил коэффициент пропорциональности  $K$ , который является характеристикой песчаника. Дальнейшие исследования показали, что этот закон может быть распространен и на другие жидкости при подстановке вместо коэффициента пропорциональности  $K$  переменной  $k/\mu$ , где  $\mu$  — это вязкость данной жидкости, а  $k$  — это свойство самой породы, называемое проницаемостью.

В этой формуле проницаемость не зависит от насыщающей жидкости, и поэтому  $k$  вполне можно определить как абсолютную проницаемость.

В более общем виде в уравнении Дарси, применительно к горизонтальному потоку, показатель гидростатического напора  $h$  заменяется разностью давлений  $\Delta P$ , вследствие чего получаем:

# Петрофизическая оценка

$$Q = \frac{K}{\mu} A \frac{\Delta P}{L} \quad (9.2)$$

Эксперименты Дарси проводились на трубе, наполненной песком, на 100% насыщенной водой, когда доминирующие условия потока были ламинарными, а между жидкостью и породой не наблюдалось никакого взаимодействия. Поэтому для практического применения этого эмпирического уравнения должны выполняться следующие условия:

**1. Ламинарный или вязкий поток.** Скорость течения жидкости настолько невелика, что может быть прямо пропорциональной градиентам потенциала.

**2. Жидкая фаза является единственной, и она насыщает поровое пространство на 100%.**

Когда присутствует более одной жидкости, проницаемость зависит уже не только от характеристик проводящей породы, но также и от относительного насыщения данных жидких фаз.

В данном случае понятие абсолютной проницаемости замещается понятиями эффективной и относительной проницаемости.

**3. Отсутствие взаимодействия между жидкостью и породой.** Условие ламинарного потока становится легко понятным, если выразить уравнение Дарси через скорость  $V$ :

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{L}$$

При этом предполагается, что для этого уравнения график скорости потока  $V$  от потенциала  $\Delta P/L$  должен изначально представлять собой прямую, где угол наклона соответствует подвижности флюида  $K/\mu$ , как показано на рис. 9.2.

Однако когда скорость флюида увеличивается, начинают проявляться инерциальные эффекты и линейное поведение

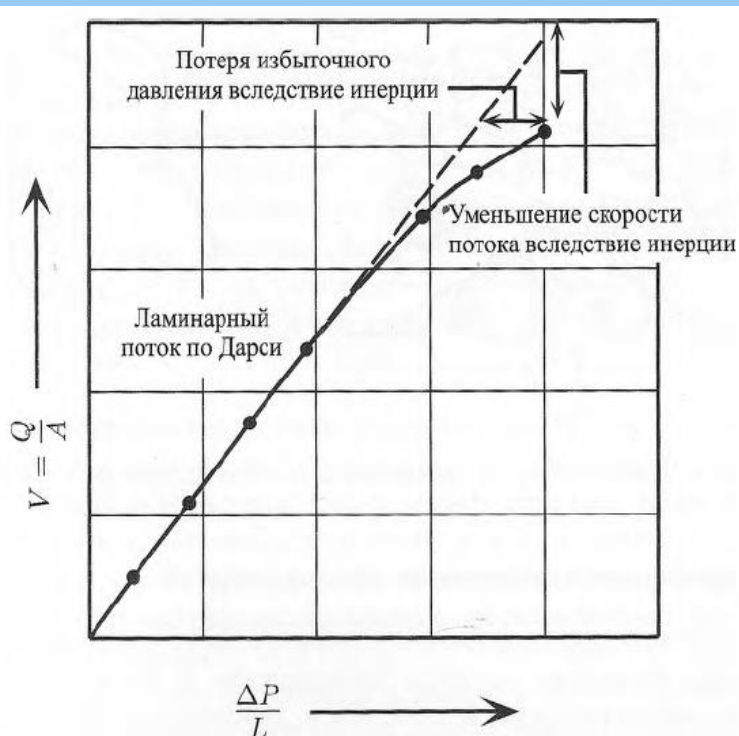


Рис. 9.2. Скорость потока в зависимости от снижения давления

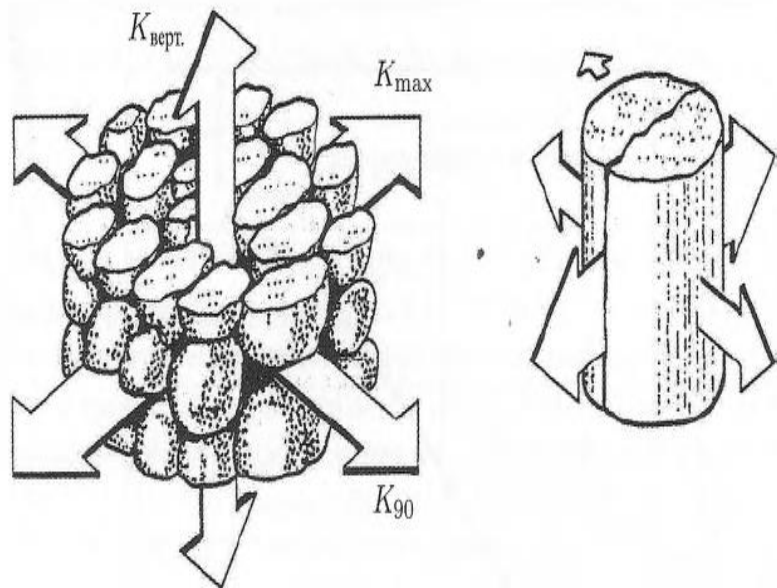
# Петрофизическая оценка

более не прослеживается.

Эти инерциальные эффекты, которые заметил и смоделировал Форхгеймер, обуславливаются *ускорением потока флюида в поровых каналах и его замедлением внутри самих пор, причем с увеличением разницы давлений эта разница становится все более значительной.*

В отличие от предыдущего, это поведение называется течением жидкости, не подчиняющимся закону Дарси, и особенно ярко проявляется в тех случаях, когда в роли флюида выступает газ.

Другая специфическая особенность проницаемости заключается в том, что, в отличие от других петрофизических свойств, она представляет собой векторную величину и часто проявляет явную анизотропию.



**Рис.9.3 - Анизотропность проницаемости матрицы породы и трещины**

Действительно, проницаемость зависит, прежде всего, от структурных характеристик породы, которые, в свою очередь, являются результатом определенного процесса отложения осадков.

Расположение зерен, слагающих данную осадочную породу, оказывает сильное влияние на характеристику потока.

Ориентация и распределение зерен, наличие глинистых или алевритистых прослоев, направляющие неоднородности, такие как стилолиты или трещины — вот некоторые характерные черты коллектора, обуславливающие анизотропию проницаемости.

Пример анизотропии проницаемости матрицы и трещины показан на рис. 9.3. Математический аспект этого анизотропного поведения состоит в том, что проницаемость, по существу, должна описываться тензором.

# Петрофизическая оценка

## 9.2.2. Лабораторные измерения на образцах керна

Анализ керна позволяет напрямую измерить в лаборатории абсолютную проницаемость при различных условиях эксперимента. В принципе, исследуемые образцы пород могут иметь различный объем. Наименьший объем имеют образцы, полученные керноотборником со стенок скважины, когда типичный размер образца цилиндрической формы составляет менее 2,5 см. Немного крупнее, от 2,5 до 3,8 см, традиционные образцы керна цилиндрической формы, отбираемые при обычном колонковом бурении.

Полноразмерные образцы диаметром до 18 см также могут подвергаться анализу, если речь идет об очень неоднородных пластах.

Измерения в стационарном и нестационарном режимах в настоящее время проводятся в большинстве лабораторий. Измерения в стационарном режиме являются стандартом на протяжении уже более тридцати лет и все еще широко используются. В данном случае, через образец породы пропускается газ (обычно воздух) с различной скоростью и одновременно измеряется давление. При этом используются относительно небольшие скорости потока, удовлетворяющие условиям вязкого потока (прямая линия на рис. 9.2). Так как геометрия образца известна, проницаемость можно рассчитать по закону Дарси.

Точность и достоверность лабораторных измерений обычно достаточно высока. Тем не менее, перед использованием этих данных необходимо учесть ряд моментов:

- **Методы очистки.** Измерения производятся на очищенных и просушенных образцах, из которых предварительно были удалены все естественные насыщающие флюиды путем перегонки в реторте или с применением растворителей. Эти методы очистки не всегда позволяют удалить все тяжелые углеводородные фракции, что может привести к занижению результатов.

- **Репрезентативность объема выборки.** При традиционных измерениях всегда присутствует проблема фактора масштаба. Образцы керна цилиндрической формы обычно отбираются через каждые 30 см, при этом считается, что они дают представление обо всем объеме данной секции керна. Однако соотношение между объемом образца, на котором измеряется проницаемость, и объемом керна составляет от 100 до 150, что ставит под сомнение репрезентативность единственного значения проницаемости, полученного в результате.

# Петрофизическая оценка

данного измерения. Если бы образец был отобран немного в другом месте, для того же самого объема керна было бы получено другое значение проницаемости, в особенности при наличии мелкомасштабных неоднородностей.

• **Эффект проскальзывания газа.** Результаты измерений следует корректировать с учетом влияния проскальзывания газа. Это явление связано с различной физикой потока жидкостей и газов в сети пор. Когда диаметр пор приближается к длине свободного пробега газа, молекулы газа имеют конечную скорость у стенок пор, тогда как с жидкостями подобного не происходит. Поэтому это явление называется проскальзывание газа (рис. 9.4).

Влияние проскальзывания газа сводится к увеличению объемной скорости потока, что более явно проявляется в породе с низкой проницаемостью и с теми газами, которые имеют малый молекулярный вес. Клинкенберг сообщает об изменениях проницаемости, когда гидравлические испытания проводятся с применением различных газов.

Данные, получаемые для газов с самым низким молекулярным весом (гелий), дают на графике прямую с самым большим углом наклона, свидетельствуя о более значительном влиянии проскальзывания.

Однако при экстраполяции различных газовых кривых в бесконечное среднее давление можно выделить общую точку, которая обозначается как  $k_i$  или эквивалентная гидравлическая проницаемость.

Осуществляя лабораторные измерения проницаемости, всегда необходимо делать поправку на эффект Клинкенберга.

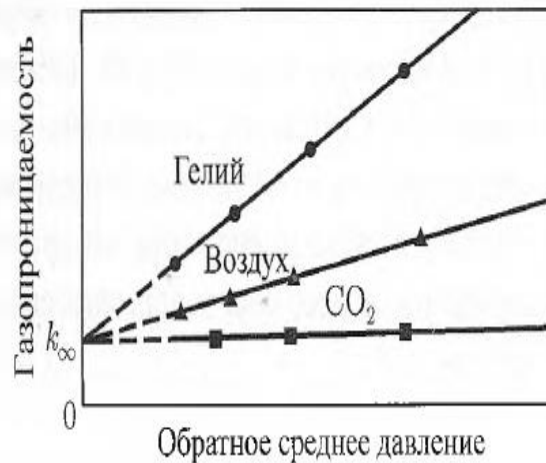
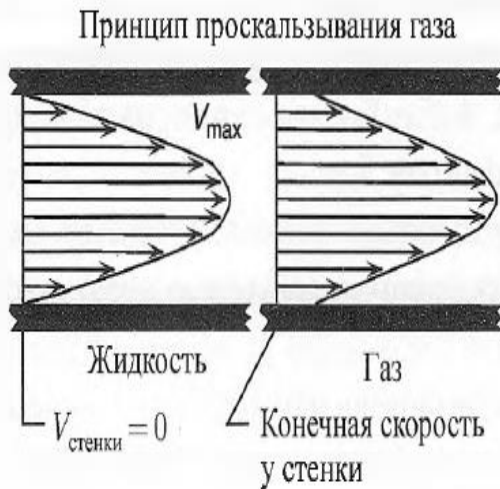


Рис.9.4- Влияние проскальзывания газа и поправка по Клинкенбергу

# Петрофизическая оценка

**Поправка на учет давления вышележащих пород.** Результаты измерений должны корректироваться с учетом давления вышележащих пород. Когда керн извлекается на поверхность, воздействие сжимающих сил исчезает и порода расширяется во все стороны.

В свою очередь, это расширение ведет к изменению геометрии порового пространства, что может сильно влиять на проницаемость породы, в зависимости от разницы давлений, степени консолидации этой породы и содержания глины.

Так, например, в неконсолидированных горных породах, отличающихся очень высоким коэффициентом сжимаемости, можно ожидать уменьшение проницаемости.

При наличии аутигенных глин, также может иметь место значительное понижение проницаемости под воздействием горного давления, так как глина может перекрывать устья пор, препятствуя циркуляции жидкости. Интересно отметить, что такое снижение проницаемости часто бывает связано с уменьшением узких пор.

Так как для большинства пород наблюдаемое снижение проницаемости не является пренебрежимо малым, получаемые данные всегда следует корректировать с учетом давления вышележащих пород. Когда имеются данные замеров горного давления, можно легко получить корректирующую зависимость, в противном случае могут применяться эмпирические соотношения.

Анализ керна является наиболее типичным источником данных проницаемости для большинства пластов. Поскольку этот метод позволяет напрямую измерить проницаемость, многие геологи и геофизики считают полученные данные эталонными, которые следует использовать для проверки информации из других источников.

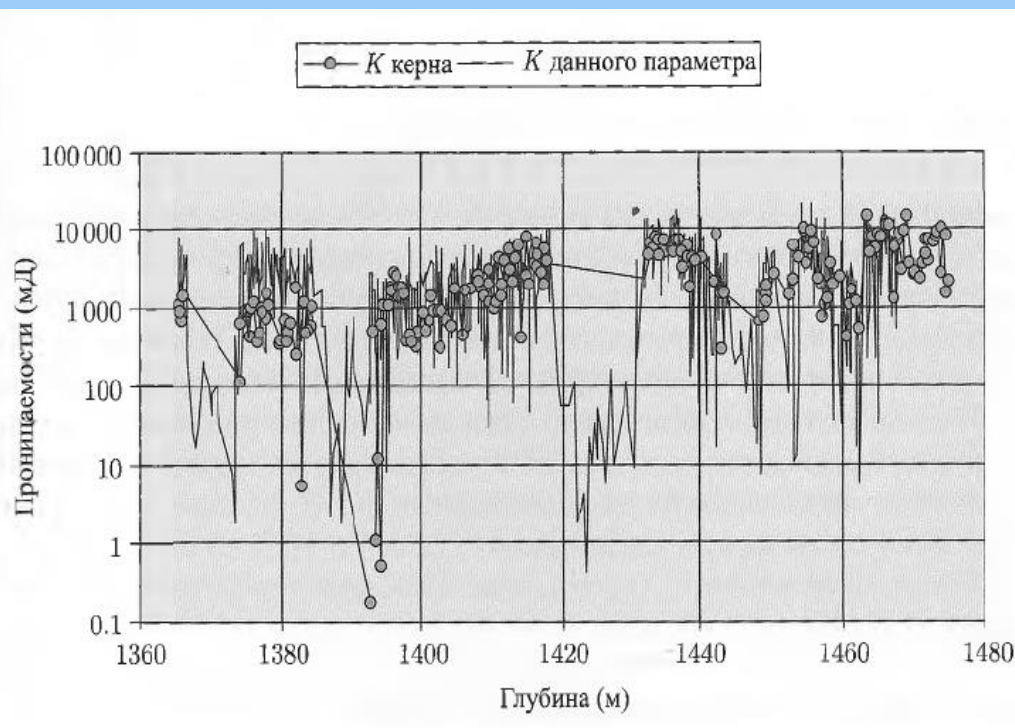
Тем не менее, следует отметить, что проницаемость по керну в лучшем случае является точной для определенного образца керна в особых лабораторных условиях, поэтому непосредственное использование этого показателя в расчетах, связанных с разработкой пластов, может привести к серьезным ошибкам.

Несколько факторов, прежде всего наличие крупномасштабных неоднородностей, могут уменьшать репрезентативность данных керна при моделировании пласта. Поэтому когда в распоряжении имеется информация из других источников, ее всегда следует сопоставлять с данными керна, а также объяснять все возникающие несоответствия.

# Петрофизическая оценка

Еще один метод, который часто применяется в лаборатории на распиленном керне, предполагает **использование пермеаметра**. Устройства такого типа применяются уже много лет и обычно используются в полевых условиях для измерения изменения проницаемости на обнаженных частях пласта.

Более сложные версии данного прибора используются в лаборатории для расчета профилей проницаемости с большим количеством измерений. Эти данные оказываются особенно полезными, если предполагается присутствие мелкомасштабных неоднородностей. Эти пермеаметры позволяют измерить абсолютное значение проницаемости с учетом поправки на эффект проскальзывания газа. Измерения могут проводиться только в условиях окружающей среды [31].



**Рис.9.5 - Сравнение проницаемости на образцах керна цилиндрической формы с данными пермеаметров**

В большинстве случаев результаты, полученные с применением пермеаметров, сопоставимы с данными обычных замеров проницаемости на образцах керна.

Однако достаточно часто наблюдаются значительные расхождения между данными этих двух типов измерений, как показано в верхней части скважины на рис. 9.5 на глубине от 4,505 до 4,540 футов (от 1373 м до 1384 м).

Такие различия могут возникнуть по разным причинам. Прежде всего, при использовании пермеаметра исследуемый объем породы гораздо меньше, а результаты измерений статистически больше подвержены влиянию мелкомасштабных неоднородностей.

Действительно, данные, полученные пермеаметром, часто достигают предельных

значений, которые не наблюдаются при стандартных измерениях на образцах керна. Другие различия обуславливаются физическими особенностями данного метода: замеры посредством пермеаметра подвержены влиянию высоких локальных скоростей газового потока, а следовательно, и значительным инерционным эффектам даже при незначительной разнице давлений.

Кроме того, геометрия трубок тока внутри небольших по объему образцов совершенно отличается от условий измерений на образцах керна цилиндрической формы, когда весь нагнетаемый газ проходит через образец из одного конца в другой.

## 9.2.3. Измерения с применением скважинных приборов

- Проницаемость в скважине можно определить с помощью методов ГИС. Стандартные измерения осуществляются при помощи испытателя пластов на кабеле [ИПК = WFT (Wireline Formation Tester)] и приборов ядерного магнитного резонанса [ЯМР = NMR (Nuclear Magnetic Resonance)]. В обоих случаях получаемые данные относятся к косвенным измерениям при пластовых давлении и температуре.

### • *А. Опробование пласта испытателем на кабеле*

- Испытатель пластов на кабеле — это каротажный прибор, устанавливаемый на необходимой глубине с целью измерения пластового давления и продуктивности, по которым возможно рассчитать проницаемость (Модульный испытатель пластов на кабеле MDT/CHDT- Cased Hole Dynamic Tester).

- Эта процедура может повторяться на различных глубинах, что дает возможность получать профили давления и проницаемости почти на всем протяжении ствола скважины. В то же самое время могут быть отобраны образцы пластового флюида. На рис. 9.6 показан ИПК в простейшей конфигурации.

Также могут применяться более сложные конструкции с многокамерными пробоотборниками. Такие скважинные приборы позволяют определять коэффициент анизотропии  $K_v/K_h$  в дополнение к показателю горизонтальной проницаемости.

# Петрофизическая оценка

В ходе исследований с применением ИПК пробоотборник прижимается к стенке скважины и герметизируется гидравлическим пакером. Затем выдвигается небольшой поршень для того, чтобы разрушить глинистую корку и установить контакт с пластом, позволяющий пластовым флюидам попасть внутрь зонда. Эти флюиды последовательно проникают в 2 небольшие пробоотборные камеры при постоянном контроле давления.

Этот этап, по аналогии с традиционными гидродинамическими испытаниями, называется этапом **падения давления**. Когда пробоотборные камеры заполняются, давление возвращается к уровню пластового, и этот этап называется этапом **восстановления давления**.

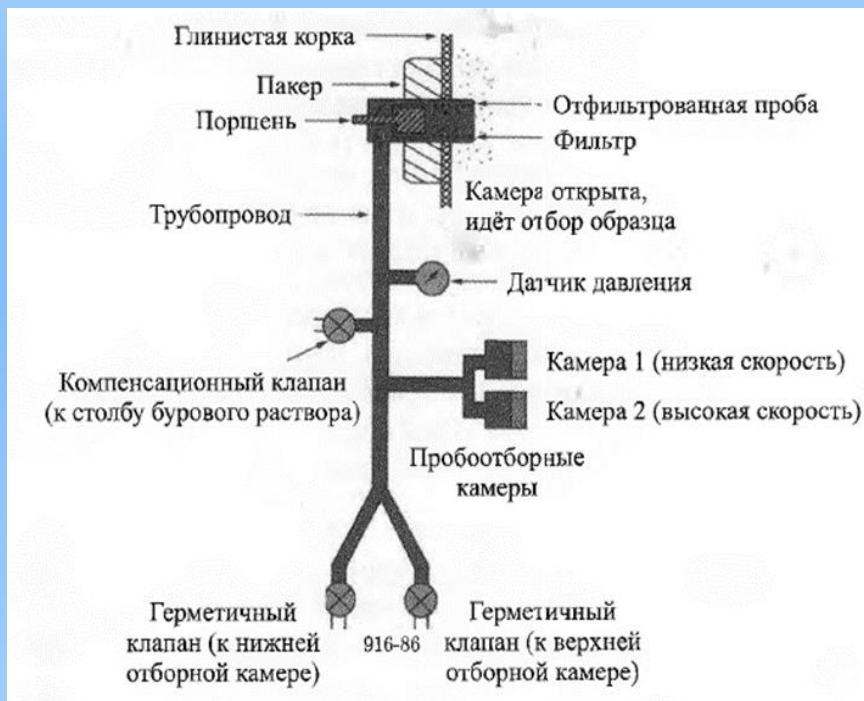


Рис. 9.6 - Базовая конфигурация ИПК

Проницаемость может быть вычислена с учетом данных, полученных как на этапе падения давления, так и на этапе его восстановления. Предполагается, что на этапе падения давления поток флюида в зонде ИПК, по сути, является сферическим или полусферическим, поэтому интерпретация проводится с применением упрощенной модели стационарного режима, что позволяет быстро рассчитать проницаемость в скважине. Интерпретация обычно проводится на основании данных в обеих пробоотборных камерах для проверки полученных результатов.

Следует заметить, что проницаемость, полученная на этапе падения давления, представляет собой эффективную проницаемость по воде в промытой зоне, поскольку жидкость, попадающая внутрь камеры, по существу является фильтратом бурового раствора.

Кроме того, глубинность этого измерения не превышает обычно 2—5 см, поэтому данные давления

# Петрофизическая оценка

сильно зависят от повреждения пласта. Вследствие этих двух факторов проницаемость, рассчитанная на этапе падения давления, часто оказывается ниже, чем ожидалась, и может считаться нижним пределом реальной проницаемости пласта.

Проницаемость также можно определить исходя из скорости восстановления давления. В данном случае процедура требует большего внимания, потому что предположение насчет сферического течения необходимо подтвердить.

Однако на данные расчетов скважинные условия оказывают меньшее влияние, потому что в этом случае глубинность составляет уже 1,5 метра, а не первые сантиметры. По этой причине измеренная проницаемость должна лучше отражать зону пласта, не затронутую проникновением, и быть ближе к значению эффективной проницаемости по нефти.

В дополнение к предварительной оценке на этапах падения и восстановления давления, проницаемость также можно определить в процессе отбора образцов. В этом случае измерение давления производится на протяжении более длительного времени, а также измеряется больший перепад давлений, что позволяет точнее определить значение проницаемости.

Однако этот вид исследования может осуществляться только один или два раза за один цикл работы ИПК.

К данным проницаемости, полученным при помощи ИПК, всегда следует относиться с осторожностью. Перед тем как считать эти данные достоверными, необходимо проверить целый ряд важных моментов:

- Данные могут оказаться плохого качества, когда нет уверенности в том, что контакт с пластом является плотным, когда проницаемость пласта является очень низкой и когда в пласте присутствует газ.
- Интерпретация данных, полученных в ходе предварительных испытаний на этапе падения и восстановления давления, фактически **позволяет** получить значение подвижности  $K/\mu$ , а не проницаемость. Так как откачиваемая жидкость обычно представляет собой смесь нефти и фильтрата бурового раствора в неизвестных пропорциях, фактический показатель вязкости  $\mu$  часто остается неизвестным.
- Значение проницаемости, полученное при помощи ИПК, особенно на этапе восстановления давления, относится к той части пласта, которая была загрязнена в процессе бурения. Результатом повреждения пласта может стать более низкое, чем ожидалось, значение проницаемости, тогда как гидродинамическое моделирование может дать аномально высокие показатели.

# Петрофизическая оценка

При наличии данных хорошего качества замеры ИПК позволяют получить информацию об эффективной проницаемости в соответствии с существующей на момент отбора образцов насыщенностью флюидом.

Так как в принципе эти условия оказываются разными, в сравнении с другими методами измерения, полученные значения проницаемости тоже будут различаться.

В заключение отметим, что измерения при помощи ИПК позволяют получить значения проницаемости, с трудом сопоставимые с аналогичными данными из других типичных источников. За некоторыми исключениями, данные опробования пласта ИПК дают информацию, которую следует воспринимать скорее как относительную, чем как абсолютную, поэтому она обыкновенно используется при принятии решений, касающихся вскрытия пласта, а не при комплексном изучении пласта.

## ***В. Измерение проницаемости с помощью ядерного магнитного резонанса (ЯМР)***

Измерения проницаемости с помощью ЯМР являются единственным методом, позволяющим получить непрерывный вертикальный профиль проницаемости в скважине по ГИС.

Физический принцип, на котором основывается оценка проницаемости, называется ***поверхностной релаксацией***. Время релаксации атомов водорода воды, насыщающей пору, значительно уменьшается за счет контакта с зернами породы на стенках поры. Это влияние стенок пор обуславливает чувствительность ЯМР к размеру пор и соответственно к проницаемости.

Было предложено множество уравнений, позволяющих определить проницаемость по измерениям ЯМР. В принципе, все они могут быть подразделены на 2 широкие категории:

1. Соотношения, в которых используется оценка остаточной водонасыщенности. Общий вид таких уравнений таков:

$$K = \phi^4 S w_i^2$$

2. Соотношения, в которых используется распределение ***T2*** (поперечное время релаксации). Общий вид этих уравнений таков:

# Петрофизическая оценка

$$K = \phi^4 T_2^2$$

В первом случае определение проницаемости фактически осуществляется в два шага. Сначала производится отсечка применительно к распределению  $T_2$  для того, чтобы разделить капиллярно связанную (остаточную) и подвижную воду. Затем полученное значение переменной  $Sw_i$  применяется для вычисления проницаемости.

Во втором случае среднее логарифмического распределения  $T_2$  в миллисекундах используется при подсчете.

В действительности разные авторы предлагают несколько различных видов этих соотношений в зависимости от применяемых методов и литологических типов, которые рассматриваются в их работах. Во всех случаях значения констант должно определяться в лаборатории с использованием измерений на керне при помощи ЯМР.

Другой важный момент связан с основополагающим предположением, согласно которому проницаемость связана с размером пор. Хотя в большинстве случаев это действительно так, не следует забывать, что проницаемость фактически зависит от размеров *устья* поры.

В некоторых случаях диагенетические воздействия могут изменить размеры поровых устьев в большей степени, чем объем порового пространства, таким образом гораздо негативнее сказываясь на проницаемости, чем на пористости.

Другой пример представлен карбонатными породами, которые иногда отличаются очень низкой проницаемостью, несмотря на большой размер пор, так как пустоты могут быть плохо связаны между собой. В таких случаях стандартные уравнения ЯМР могут дать неверные результаты, поскольку ЯМР прежде всего чувствителен к размеру тел пор и нечувствителен к размеру поровых устьев.

## 9.3. Гидродинамические испытания

Гидродинамические испытания являются надежным средством для оценки проницаемости коллектора. Когда скважина вводится в эксплуатацию или переводится в режим нагнетания (когда ее дебит изменяется), или когда скважина останавливается, пласт реагирует на это изменением давления, которое прямо зависит от его фильтрационного потенциала, а соответственно, и от проницаемости.

# Петрофизическая оценка

Для расчета проницаемости породы может применяться множество типов гидродинамических испытаний. Все они основываются на применении основных уравнениях притока для интерпретации зарегистрированных значений давления и данных по дебиту. Среди этих испытаний следует упомянуть пластоиспытания на буровых трубах, DST (Drill Stem Tests), традиционные гидродинамические испытания (КВД, КВД) и мультискважинные испытания (импульсные и гидропрослушивание).

Гидродинамические испытания являются одним из наиболее широко применяемых методов для определения проницаемости пласта. Классическим методом является интерпретация данных восстановления давления по зависимости наблюдаемых данных статического давления при закрытом устье скважины от так называемого времени суперпозиции. На рис. 4.22 показан один из таких графиков, хорошо известный как график Хорнера.

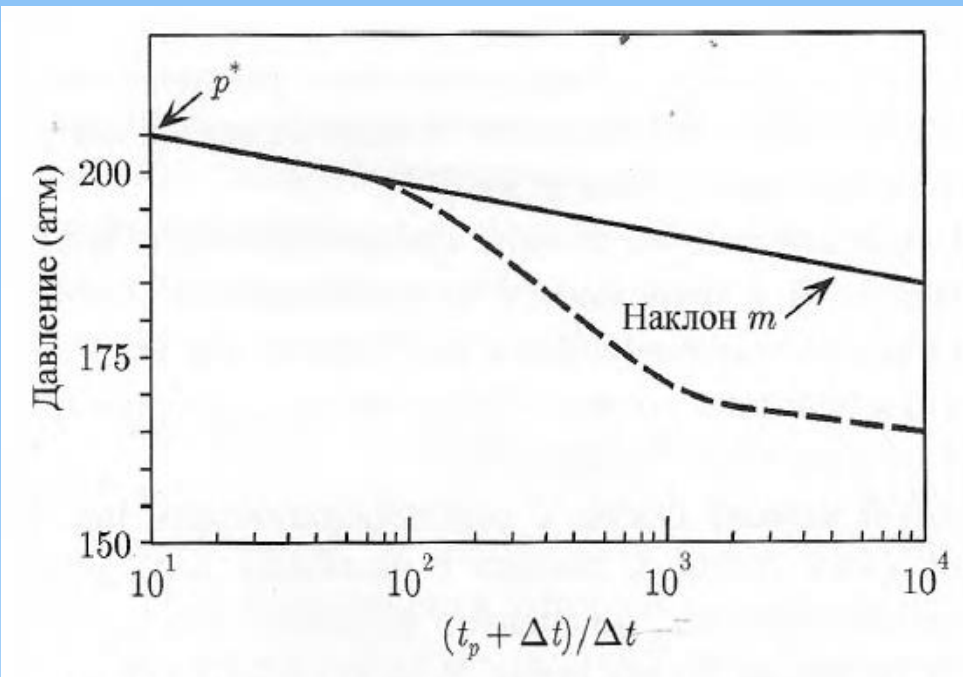


Рис.9.7- График Хорнера для оценки проницаемости

Когда периоды притока хорошо дифференцированы, данные давления на графике должны иметь прямую часть, угол наклона которой равен:

$$m = \frac{162,6qB\mu}{KH} \quad (4.14)$$

где  $q$  — это дебит скважины до ее остановки,  $B$  и  $\mu$  — объемный коэффициент и вязкость,  $K$  — проницаемость, а  $H$  — мощность работающего интервала (промысловые единицы). Решив это уравнение, можно определить проницаемость пласта.

Альтернативный метод оценки проницаемости основывается на совмещении палеточных кривых, в ходе которого данные давления и их производные

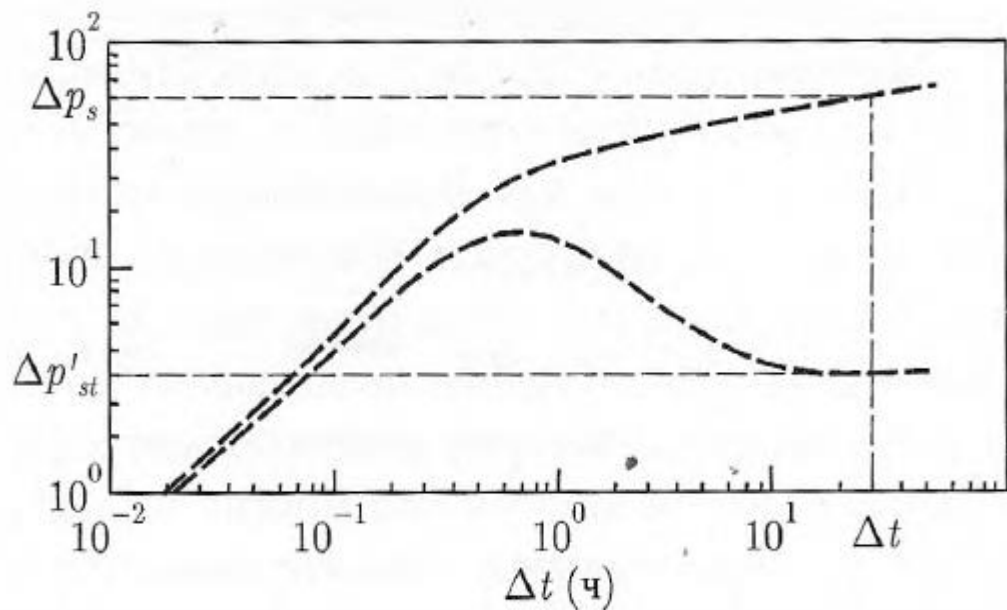
# Петрофизическая оценка

изображаются как функции от времени на диагностическом графике в билогарифмическом масштабе. В этом случае проницаемость может определяться при помощи значения «полки» производной  $\Delta p'_{st}$ , как показано на рис. 9.8.

Тогда уравнение приобретает следующий вид:

$$k = \frac{141,2 q B_{\mu}}{\Delta p'_{st} H}$$

где все другие переменные такие же, как и в предыдущих уравнениях. Ясно наблюдаемая «полка» производной в данном случае является неперенным условием интерпретации



**Рис. 9.8 - Диагностический график в двойном логарифмическом масштабе для интерпретации данных гидродинамических испытаний**

Интерпретация проницаемости по данным гидродинамических испытаний связана с некоторыми проблемами, которые необходимо решить для того, чтобы понять каким образом ее использовать.

## Качество данных.

Проблема достоверности измерения давления и дебита всегда отличается особой важностью. Потому что, многие факторы могут привести к ошибочным интерпретациям.

К примеру, отсутствие точных данных о времени притока, недостаточная продолжительность испытаний, низкая разрешающая способность измерений давления и условия многофазного потока и т.д.

# Петрофизическая оценка

- **Определение проницаемости.** Вне зависимости от выбора метода интерпретации основным параметром, который может быть получен по данным гидродинамических испытаний, является угол наклона прямой или «полка» производной давления.
- Определение проницаемости предполагает знание целого ряда других параметров, причем некоторые из них изначально несут в себе неопределенность. Наиболее важным среди данных параметров является  **$H$** , мощность работающего интервала. Именно по этой причине инженеры-разработчики иногда предпочитают говорить о мощности работающего интервала  **$KH$** , а не только о проницаемости. В некоторых случаях, когда испытания проводятся с применением прибора, который одновременно позволяет измерить забойное давление и дебит скважины, такая неопределенность может уменьшаться.
- **Эффективная и абсолютная проницаемость.** Гидродинамические испытания измеряют эффективную проницаемость по нефти (или по газу) при пластовых условиях насыщенности, давления и температуры.. Когда в продуктивном пласте находится лишь остаточная водонасыщенности,  **$Sw_i$**  - эффективная проницаемость по нефти представляет собой долю абсолютной проницаемости, величина которой зависит от петрофизических свойств коллектора и условий смачиваемости.

Во многих случаях этот показатель, который соответствует максимальной относительной проницаемости по нефти  **$Kr_{отм}$**  может приближаться к 1, вследствие чего становится возможным прямое сопоставление значений абсолютной и эффективной проницаемости по результатам гидродинамических испытаний.

Однако нередко значение этого показателя не превышает 0,6, и в таком случае проницаемость по данным гидродинамических испытаний может оказаться значительно ниже по сравнению, например, с данными керна.

Ситуация становится еще хуже при испытаниях в условиях многофазного потока, когда водонасыщенность в пласте выше значения  **$Sw_*$** , и/или при наличии в пласте газа. В таких случаях рассчитанная эффективная проницаемость по нефти является функцией нефтенасыщенности в пласте и может быть значительно ниже по сравнению с показателем абсолютной проницаемости.

# Петрофизическая оценка

**Объем исследования.** При обычном гидродинамическом испытании радиус исследования исчисляется десятками и первыми сотнями метров, что позволяет охватить объем пласта в тысячи раз больше, чем при использовании любого другого метода оценки. То есть гидродинамические испытания являются источником информации в мегамасштабе в сравнении с макроскопическими данными, получаемыми в результате кернового анализа, измерений с помощью ГИС и эмпирических зависимостей.

Из этого следует, что в данном случае измеряются крупномасштабные неоднородности пласта, оказывающие значительное влияние на полученное значение проницаемости (рис. 4.24).

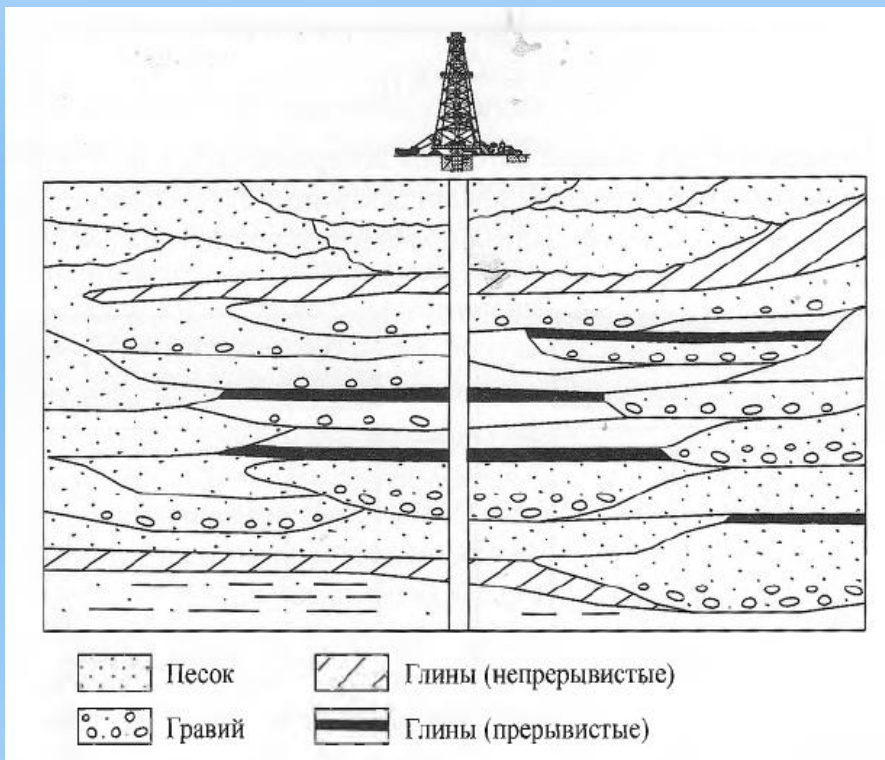
Считается, что при наличии данных высокого качества гидродинамические испытания позволяют точнее всего определить фактическую проницаемость пласта.

Однако необходимо проявлять осторожность, когда возникает необходимость в их сопоставлении с данными, полученными из других источников, и удостовериться в том, что интерпретация осуществляется надлежащим образом.

## 9.4. Расходометрия

Расходометрия применяется на многих месторождениях как средство мониторинга продуктивных пластов. Главная особенность этого вида измерения состоит в том, что он позволяет получить количественное описание ряда параметров как функции глубины, наиболее важным из которых является дебит отдельных фаз в многофазовом потоке.

В рамках комплексного исследования результаты, полученные с использованием дебитометра, представляют особый интерес, поскольку они



**Рис.9.9- Объем исследования гидродинамического испытания и крупномасштабные неоднородности**

# Петрофизическая оценка

обеспечивают связь статического описания и фактических гидродинамических характеристик скважины.

В частности, профиль расходомера может быть пересчитан в профиль проницаемости, если известно общее значение **КН** для данной скважины.

Сущность этой процедуры состоит в вертикальном распределении общего **КН** в зависимости от измеренных показателей дебита. Средняя проницаемость **к** на участке **AZ** по траектории ствола скважины рассчитывается следующим образом:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta Z} KН$$

где  $\Delta F$  — это приращение общего потока на интервале  $\Delta Z$ , а **КН** — это произведение проницаемости на толщину пласта скважины, определяемое по данным гидродинамических испытаний. Данная процедура приведена на рис. 4.25.

Получившиеся профили можно сравнить с измерениями по керну или с другими профилями проницаемости в макромасштабе, что позволяет подтвердить правильность имеющейся статической петрофизической модели.

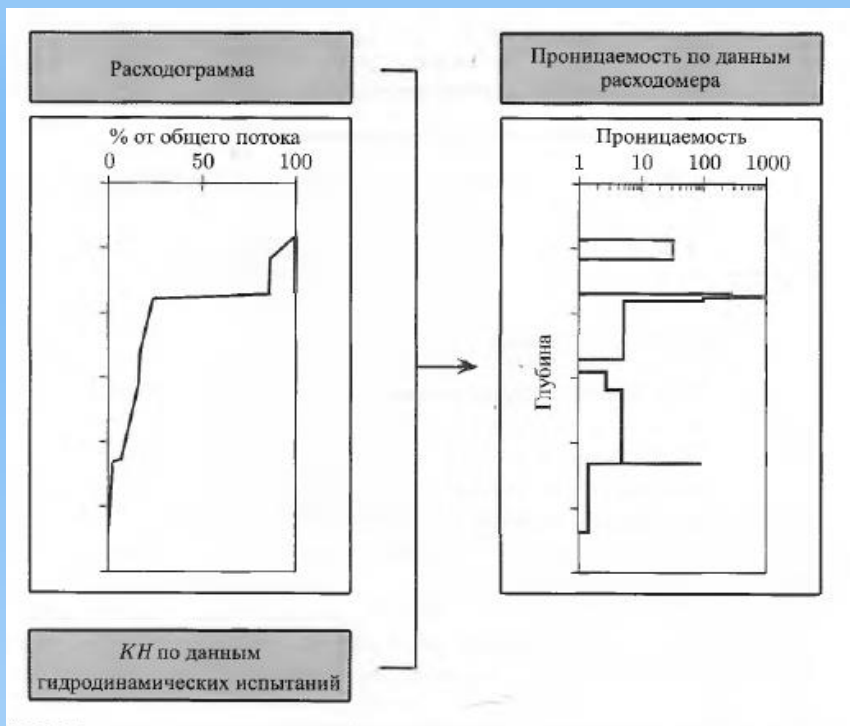


Рис. 9.10- Процедура получения профиля проницаемости, исходя из данных расходомера

# Петрофизическая оценка

На рис. 9.11 представлен пример сравнения данных расходомера с результатами керна, в ходе которого данные были преобразованы в общие профили **КН**. В данном случае наблюдается хорошее согласование этих двух типов данных.

Выполнять такие проверки всегда следует очень внимательно. Так, например, на данные расходомера оказывают влияние дефекты призабойной зоны (скин-фактор), что может привести к недооценке потенциальной продуктивности затронутых интервалов.

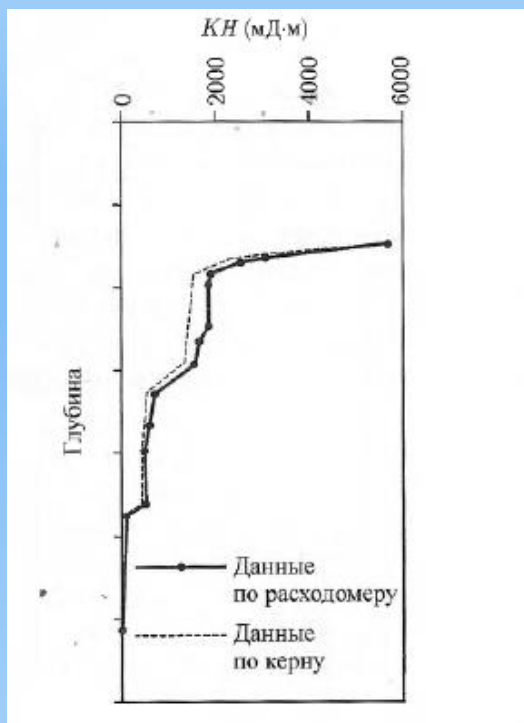
Кроме того, разрешающая способность по вертикали этого каротажного прибора обычно ниже по сравнению с традиционными способами оценки проницаемости в макромасштабе.

С другой стороны, образцы керна должны отбираться равномерно, чтобы избежать погрешностей в получающихся профилях.

С этой точки зрения возможность неудовлетворительного схождения данных по керну и данных расходомера не вызывает удивления. Расходомер позволяет оценить эффективную проницаемость по нефти, тогда как по данным керна определяется абсолютная проницаемость.

Помимо этого, информация, получаемая при помощи расходомеров, основывается на гораздо большем объеме исследуемого материала по сравнению с традиционными макромасштабными данными.

Явное рассогласование между этими данными может свидетельствовать о наличии крупномасштабной неоднородности, которая не была определена в ходе обычных макромасштабных замеров, но оказывает значительное влияние на характеристики потока флюидов.



**Рис.9.11 - Сравнение данных КН по керну и расходомеру**

**Благодарю за внимание!**

**Thank you for your attention!**

**Назарларыңызға рахмет!**