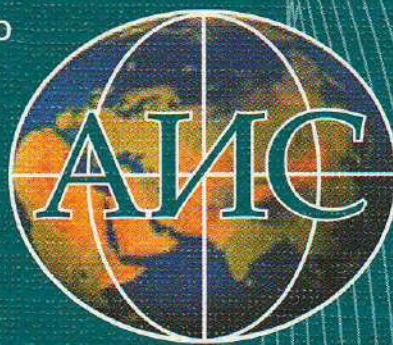


МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО
И ДЕЛОВОГО СОТРУДНИЧЕСТВА ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ
ИССЛЕДОВАНИЯМ И РАБОТАМ В СКВАЖИНАХ

ISSN 1810-5599



3

(237)



ООО НПФ «АМК ГОРИЗОНТ»
15 лет

КАРОТАЖНИК

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

ТВЕРЬ 2014

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Н. С. Березовский

Зам. гл. редактора,
научный редактор
Ю. И. Кузнецов, д. г.-м. н., проф.

Отв. редактор С. В. Ларева

Редактор И. В. Шункова

Члены редакционной коллегии:

Ю. Н. Бармаков, д. т. н., проф.

Я. Н. Басин, д. т. н., проф. (США)

А. М. Блюменцев, д. т. н., проф.

А. Ф. Боярчук, к. г.-м. н.

Р. А. Валиуллин, д. т. н., проф.

В. А. Велижанин, к. т. н.

И. Н. Гайворонский, д. т. н., проф.

С. А. Дудаев, д. т. н.

Ф. Х. Еникеева, д. т. н.

В. Ю. Зайченко, д. г.-м. н.

В. И. Иванников, д. т. н., проф.

Л. Е. Кнеллер, д. т. н., проф.

Н. Г. Козыряцкий, к. т. н.

В. Ф. Козяр, д. т. н., проф.

А. К. Коньсов, д. т. н. (Казахстан)

М. Д. Красножон, д. геол. н.

(Украина)

А. А. Кременецкий, д. г.-м. н., проф.

О. Л. Кузнецов, д. т. н., проф.

Э. Е. Лукьянов, д. т. н.

А. В. Малинин, к. г.-м. н.

Ф. П. Митрофанов, д. г.-м. н.,

проф., академик РАН

А. А. Молчанов, д. т. н., проф.

Т. Н. Нестерова, к. т. н.

Г. А. Павленко, к. т. н.

В. А. Трофимов, д. г.-м. н., проф.

В. Г. Фоменко, д. г.-м. н., проф.

Р. Т. Хаматдинов, д. т. н., проф.

М. И. Эпов, д. т. н., проф.,

академик РАН

Г. Г. Яценко, д. г.-м. н.

Издательство "АИС"

Россия, 170041, г. Тверь,
ул. Зинаиды Коноплянниковой,
д. 17, корп. 1

Лицензия ЛР № 030838

от 29 июня 1998 г.

Свидетельство ПИ № 77-36891

от 20 июля 2009 г.

Индекс Роспечати – 82015.

ISSN 1810-5599.

Подписано в печать 3.03.2014.

Формат 60/84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 10,5. Уч.-изд. л. 10,5.

Тираж 1130. Зак. № 1444.

Компьютерная верстка, макет

ООО "Издательство "Триада".

Отпечатано в ООО "Тверская
фабрика печати".

© Издательство "АИС", 2014



Научно-технический вестник

(рецензируемое издание)

Год издания двадцать третий

КАРОТАЖНИК

Выпуск 3 (237)

Посвящен 15-летию

ООО НПФ "АМК ГОРИЗОНТ"

ТВЕРЬ
2014

УДК 622.243.24

Л. Г. Леготин

ООО НПФ "АМК ГОРИЗОНТ"

ОЦЕНКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ ПО ДАННЫМ АМК "ГОРИЗОНТ"

По результатам, полученным при спуске и подъеме автономных скважинных приборов на буровом инструменте в скважины (в том числе в горизонтальные), показана возможность выделения проницаемых интервалов и выявления заколонных перетоков. Приведены соответствующие примеры. По диаграммам изменения давления в процессе спуска, остановки и подъема бурового инструмента рассчитаны кривые восстановления уровня, которые можно использовать для оценки гидродинамических процессов в скважине.

Ключевые слова: каротаж на буровых трубах, горизонтальные скважины, фильтрационный потенциал, динамический перепад давления, гидродинамические исследования, примеры.

При геофизических исследованиях горизонтальных скважин и боковых стволов автономной аппаратурой, спускаемой на буровом инструменте, возникает ряд специфических особенностей по сравнению с геофизической аппаратурой на кабеле. В качестве примера рассмотрим особенности измерения давления в скважине приборами на буровых трубах.

Во время спуска бурового инструмента в скважине происходит вытеснение жидкости и подъем ее уровня, а значит и увеличение давления (рис. 1). При этом возникает дополнительный динамический перепад давления, величина которого пропорциональна скорости спуска бурового инструмента и вязкости бурового раствора, который перемещается вверх. Динамический перепад давления зависит от диаметра бурового инструмента и от диаметра скважины. Причем его величина тем больше, чем меньше зазор между буровым инструментом и стенкой скважины (поршневой эффект). При подъеме бурового инструмента происходит обратный процесс, в результате чего в скважине происходит снижение давления. Таким образом, во время спускоподъемных операций (СПО) давление, которое регистрируется в приборе, будет существенно отличаться от гидростатического давления в скважине.

Отметим, что под действием перепада давления в скважине через ее стенку начинается фильтрация бурового раствора в пласт при спуске или фильтрация жидкости из пласта в скважину при подъеме бурового инструмента. При этом скорость фильтрации жидкости зависит от ее вязкости, от проницаемости пород и величины перепада давления.

Для выявления фильтрации жидкости через стенку скважины можно использовать метод самопроизвольной поляризации (ПС). При регистрации ПС в скважине одновременно измеряются диффузионно-адсорбционные $E_{да}$ и фильтрационные $E_{ф}$ потенциалы:

$$U_{пс} = E_{да} + E_{ф}. \quad (1)$$

Диффузионно-адсорбционные потенциалы возникают в пористой среде на границе контакта растворов с разным химическим составом и концентрацией растворенных солей [3]. Фильтрационные потенциалы возникают при фильтрации жидкости через стенку скважины, причем величина и знак потенциалов зависят от свойств жидкости, от проницаемости пород и перепада давления в скважине относительно пластового давления.

Пористую породу можно представить в виде системы капилляров, через которые протекает жидкость. При этом на концах капилляра возникает фильтрационная разность потенциалов $E_{ф}$, которая определяется уравнением Гельмгольца–Смолуховского [1]:

$$E_{ф} = \frac{\epsilon \zeta \rho_s}{4\pi\mu} \Delta P, \quad (2)$$

где ϵ , ρ_s , μ – диэлектрическая проницаемость, удельное электрическое сопротивление и абсолютная вязкость жидкости соответственно; ΔP – перепад давления на концах капилляра; ζ – электрокинетический потенциал.

Величина электрокинетического ζ -потенциала зависит от типа породы, структуры порового пространства и электрохимических свойств жидкости, заполняющей поры. При этом ζ -потенциал может быть по знаку как положительным, так и отрицательным.

В настоящее время при бурении скважин используется большое разнообразие промывочных жидкостей. Поэтому в жидкости вблизи от стенок пор в породе образуется ζ -потенциал, величина которого неизвестна. В результате выражение (2) для фильтрационного потенциала можно применять только на качественном уровне.

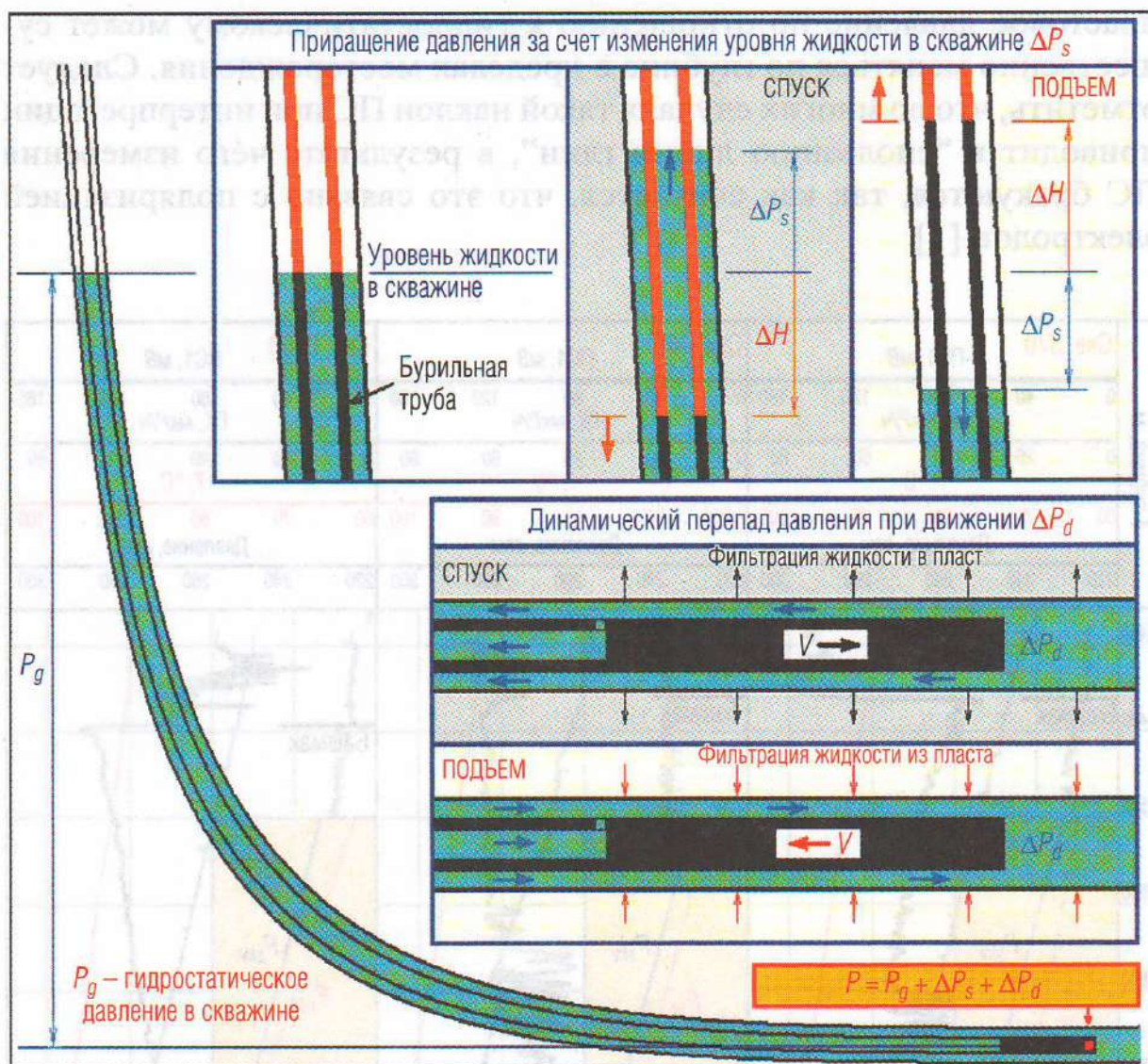


Рис. 1. Схема вытеснения жидкости во время спуска бурового инструмента в скважину

В реальных условиях измерений фильтрационный потенциал возникает за счет перепада давлений в данной точке скважины относительно удаленного контура с пластовым давлением $P_{пл}$:

$$E_{\phi} = \frac{\epsilon \zeta \rho_s}{4\pi\mu} (P_0 - P_{пл}). \quad (3)$$

На рис. 2 приведены диаграммы ПС, зарегистрированные в вертикальных скважинах, пробуренных на одном из месторождений Западной Сибири. Характер наклона диаграмм ПС показывает, что

пластовое давление по отношению к гидростатическому может существенно меняться по глубине в пределах месторождения. Следует отметить, что во многих случаях такой наклон ПС при интерпретации приводит к “сползанию линии глин”, в результате чего измерения ПС бракуются, так как считается, что это связано с поляризацией электродов [1].

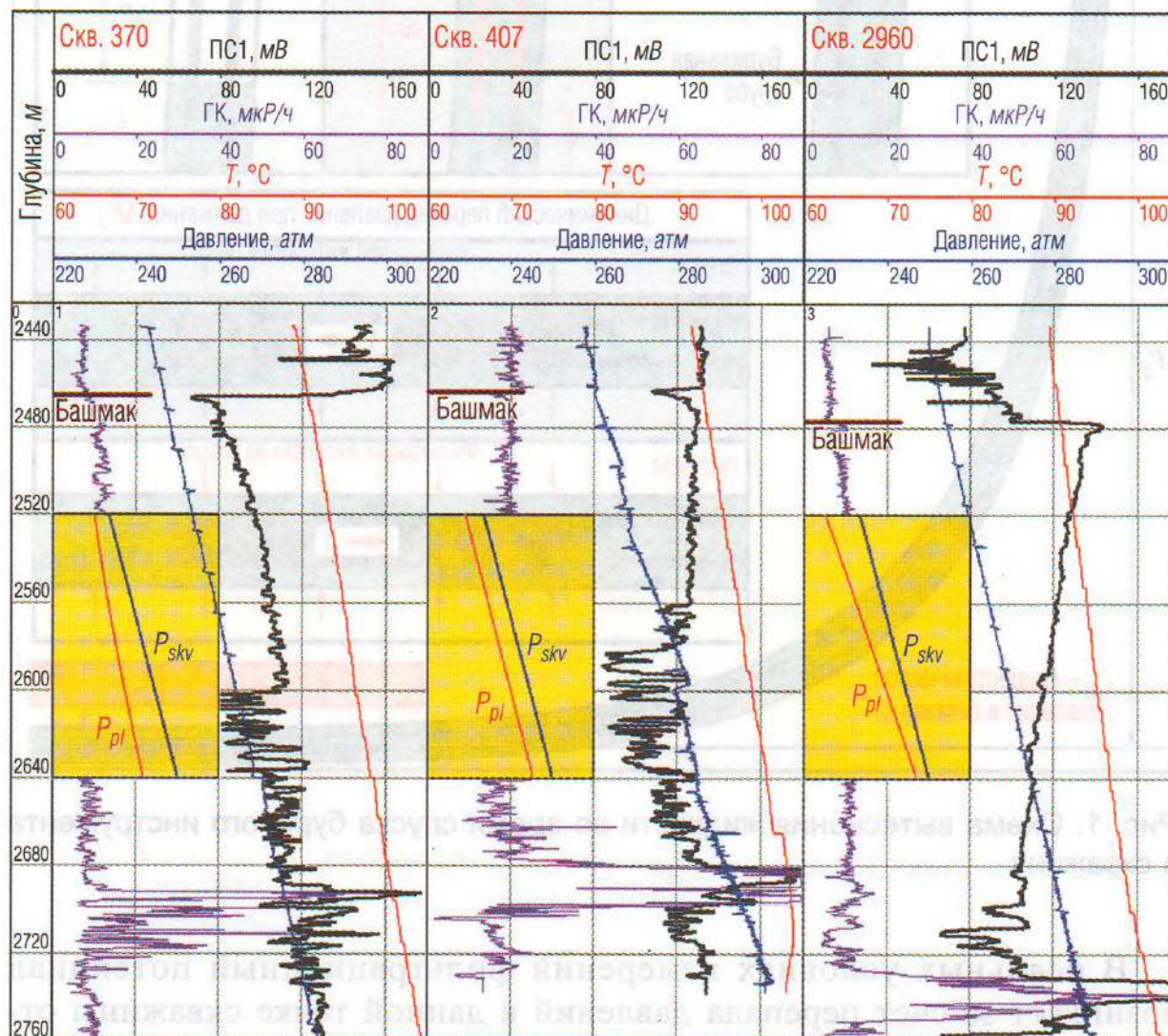


Рис. 2. Изменение ПС при различных условиях фильтрации в скважине

В обычных условиях при измерении ПС в скважине выделить фильтрационную составляющую потенциала не удастся. Однако если провести измерения ПС с использованием автономной аппаратуры при спуске ($ПС_s$) и подъеме ($ПС_p$) бурового инструмента, то в од-

ном и том же интервале исследований получим две диаграммы ПС при разных давлениях в скважине, а значит и при разных условиях фильтрации жидкости через стенки скважины (рис. 3). При этом в соответствии с выражениями (1), (3) получим

$$dE_{\phi} = \frac{\epsilon \zeta \rho_s}{4\pi\mu} (P_p - P_s). \quad (4)$$

На рис. 3 приведена диаграмма $dPS_{p-s} = PC_p - PC_s$, которая отражает изменение фильтрационной составляющей потенциала по стволу скважины за счет разности давлений в скважине при подъеме и спуске. Так как диффузионно-адсорбционные потенциалы не зависят от давления в скважине, то они автоматически исключаются из диаграммы dPS_{p-s} .

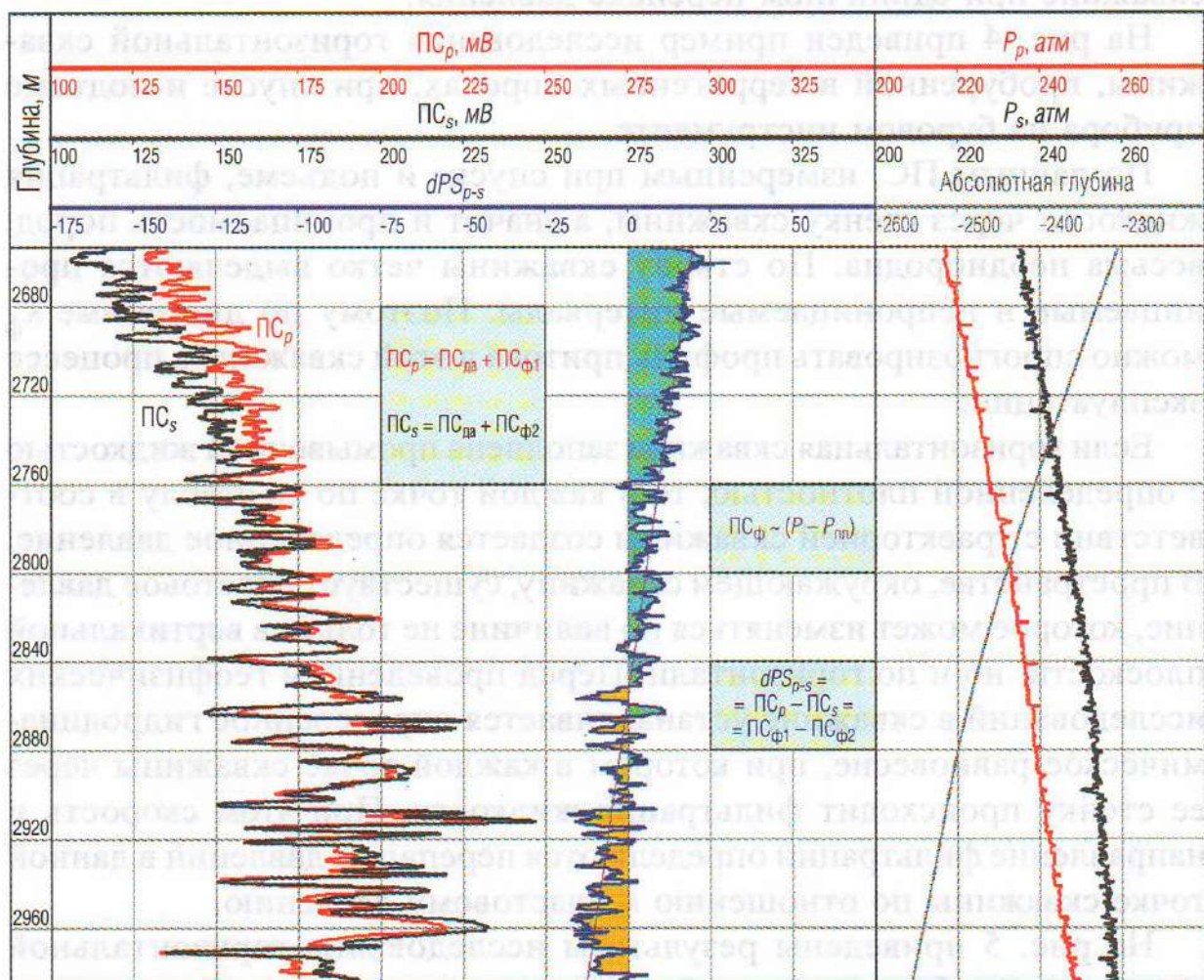


Рис. 3. Выделение фильтрационной составляющей ПС

Характерный наклон диаграммы dPS_{p-s} относительно нулевого уровня показывает, что разность между гидростатическим давлением в скважине и пластовым давлением вокруг нее уменьшается по направлению к забою скважины. Аномалии на диаграмме dPS_{p-s} позволяют выявить интервалы пород с различной проницаемостью.

Для удобства сопоставления результатов измерений в скважине введем относительный коэффициент фильтрации:

$$k_{\phi} = \frac{dE_{\phi}}{P_p - P_s} = \frac{\varepsilon \zeta \rho_s}{4\pi\mu}. \quad (5)$$

Коэффициент фильтрации k_{ϕ} определяется только свойствами породы и фильтраата в ее поровом пространстве. Этот коэффициент показывает величину изменения фильтрационного потенциала в скважине при единичном перепаде давления.

На рис. 4 приведен пример исследования горизонтальной скважины, пробуренной в терригенных породах, при спуске и подъеме прибора на буровом инструменте.

По данным ПС, измеренным при спуске и подъеме, фильтрация жидкости через стенку скважины, а значит и проницаемость пород, весьма неоднородна. По стволу скважины четко выделяются проницаемые и непроницаемые интервалы. Поэтому по диаграмме k_{ϕ} можно спрогнозировать профиль притока в этой скважине в процессе эксплуатации.

Если горизонтальная скважина заполнена промывочной жидкостью с определенной плотностью, то в каждой точке по ее стволу в соответствии с траекторией скважины создается определенное давление. В пространстве, окружающем скважину, существует пластовое давление, которое может изменяться по величине не только в вертикальной плоскости, но и по горизонтали. Перед проведением геофизических исследований в скважине устанавливается определенное гидродинамическое равновесие, при котором в каждой точке скважины через ее стенку происходит фильтрация жидкости. При этом скорость и направление фильтрации определяются перепадом давлений в данной точке скважины по отношению к пластовому давлению.

На рис. 5 приведены результаты исследования горизонтальной скважины, пробуренной в карбонатных породах, в которой по данным измерения ПС выделяются интервалы фильтрации.

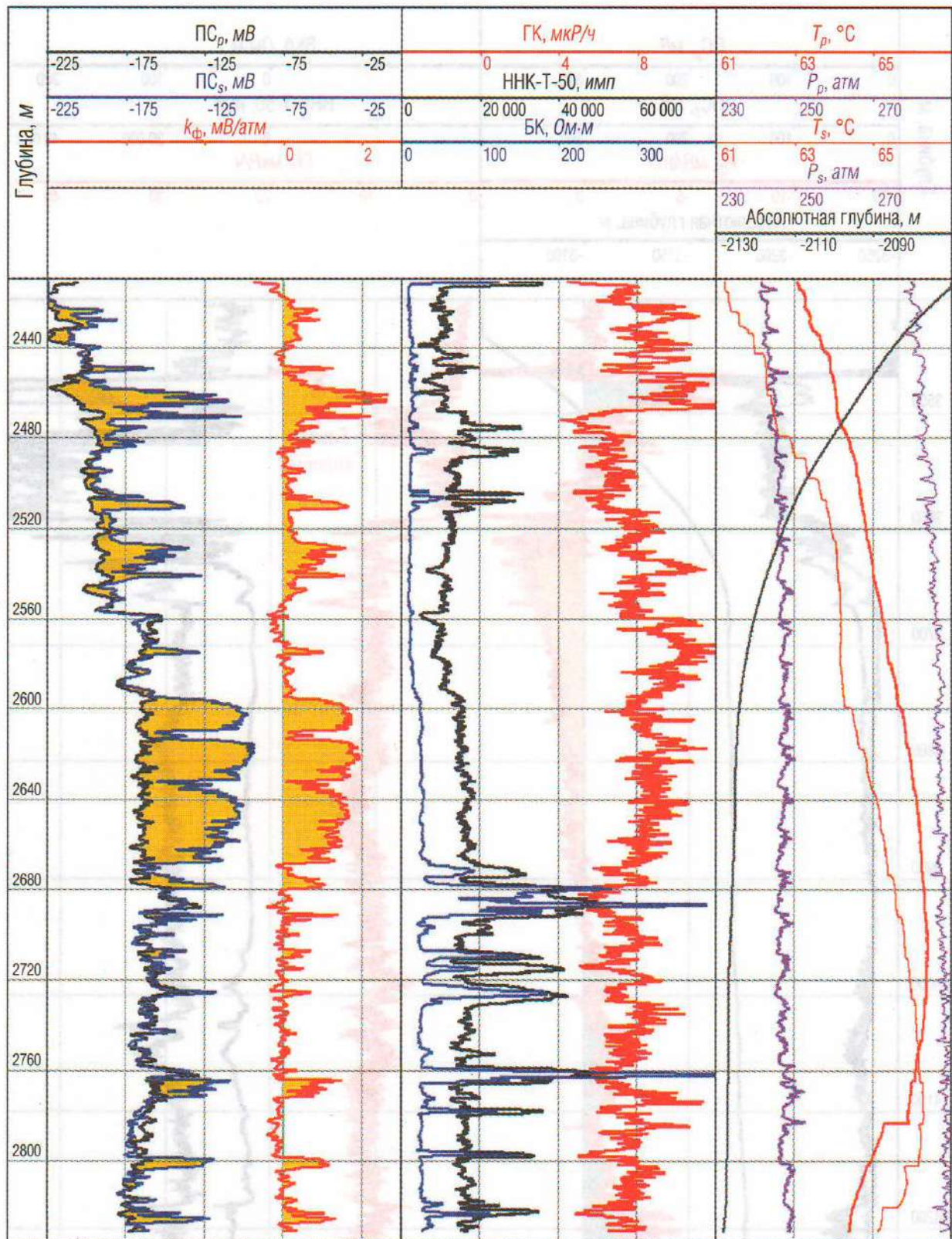


Рис. 4. Выделение проницаемых интервалов в горизонтальной скважине ($D_c = 123,8$ мм, $\rho_s = 0,2$ Ом-м)

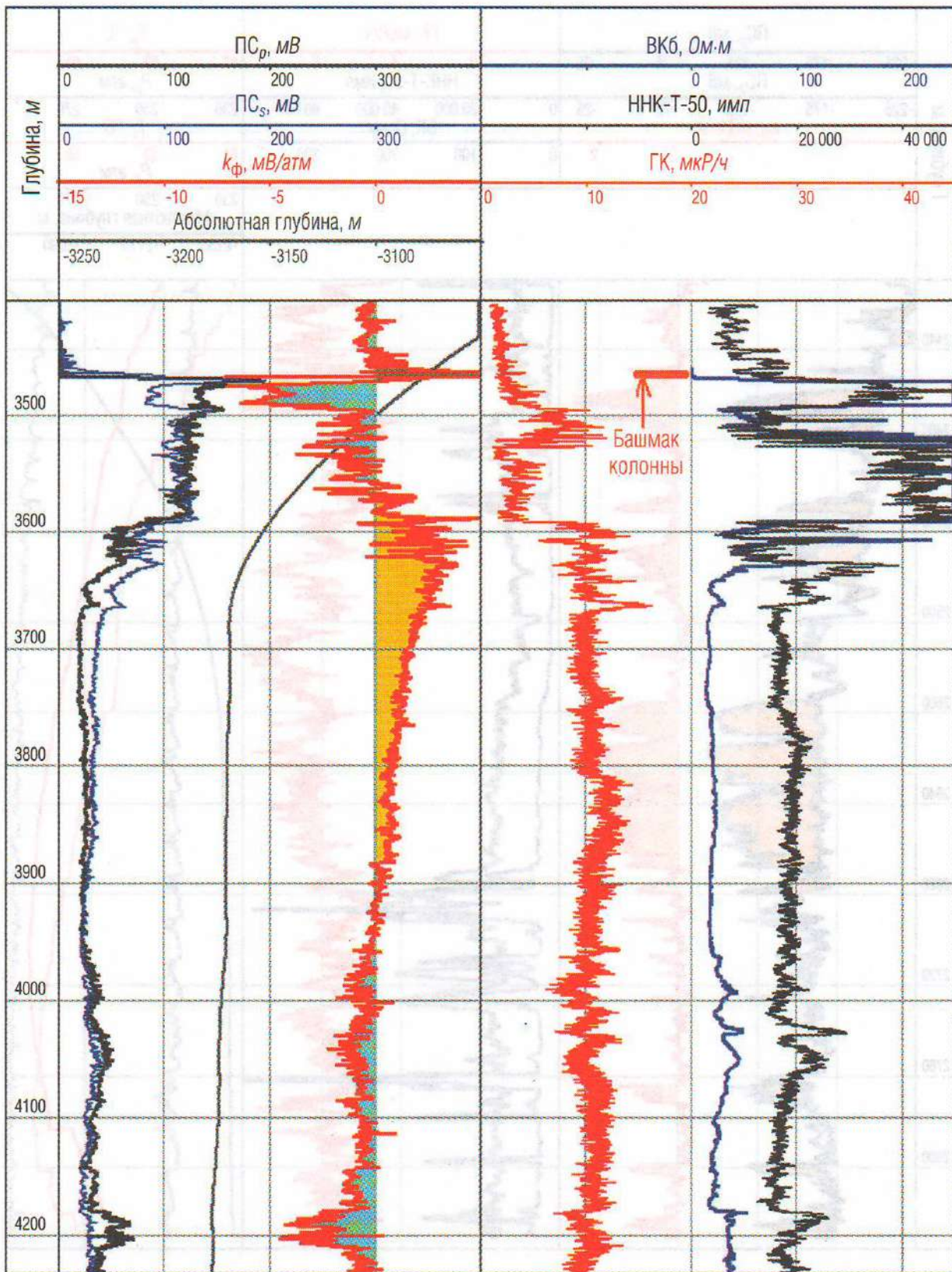


Рис. 5. Выявление перетоков в горизонтальной скважине

Из приведенных диаграмм следует, что при повышении или снижении давления в скважине относительно равновесного значения происходит изменение фильтрации жидкости через стенку скважины по ее длине. Причем, если в интервале 3600–3900 м наблюдается увеличение фильтрации жидкости из скважины в породу, то в остальных интервалах, наоборот, происходит увеличение фильтрации жидкости из породы в скважину. Таким образом, в горизонтальной скважине возникают межпластовые перетоки.

При фильтрации жидкости через поровое пространство пород происходит разделение электрических зарядов, за счет чего и образуются потенциалы фильтрации. В результате под действием перепада давления в скважине возникают достаточно сильные электрические токи, которые можно выявить даже через обсадную колонну.

На рис. 6 приведены результаты измерений ПС в обсаженной скважине. Вначале измерения проводились на спуске при скорости 3300 м/ч, затем на подъеме со скоростью 220 м/ч и на втором спуске со скоростью 2000 м/ч. В соответствии со скоростью движения колонны с прибором изменяется динамическое давление в скважине и в окружающем пространстве, в том числе в породе за обсадной колонной.

Во всех трех случаях зарегистрированы диаграммы ПС и давления. По результатам измерений определены коэффициенты

$$k_{\phi 1} = \frac{ПС_p - ПС_{s1}}{P_p - P_{s2}} \text{ и } k_{\phi 2} = \frac{ПС_p - ПС_{s2}}{P_p - P_{s2}} \text{ относительно данных измерений}$$

на подъеме. Из полученных диаграмм (рис. 6) видно, что несмотря на значительные изменения скорости перемещения прибора в скважине коэффициенты фильтрации практически совпадают и показывают характер изменения фильтрации жидкости за колонной. По результатам измерений в интервале 2295–2370 м из-за недостаточной изоляции обсадной колонны выделяется заколонный переток жидкости, который также отмечается по диаграмме термометрии, зарегистрированной на спуске.

На рис. 7 приведен пример исследования скважины, в которой по данным АКЦ выявлены интервалы с плохим качеством цементирования обсадной колонны. В этих же интервалах по данным измерения ПС на спуске и подъеме отмечается увеличение фильтрации жидкости в затрубном пространстве при изменении давления в скважине.

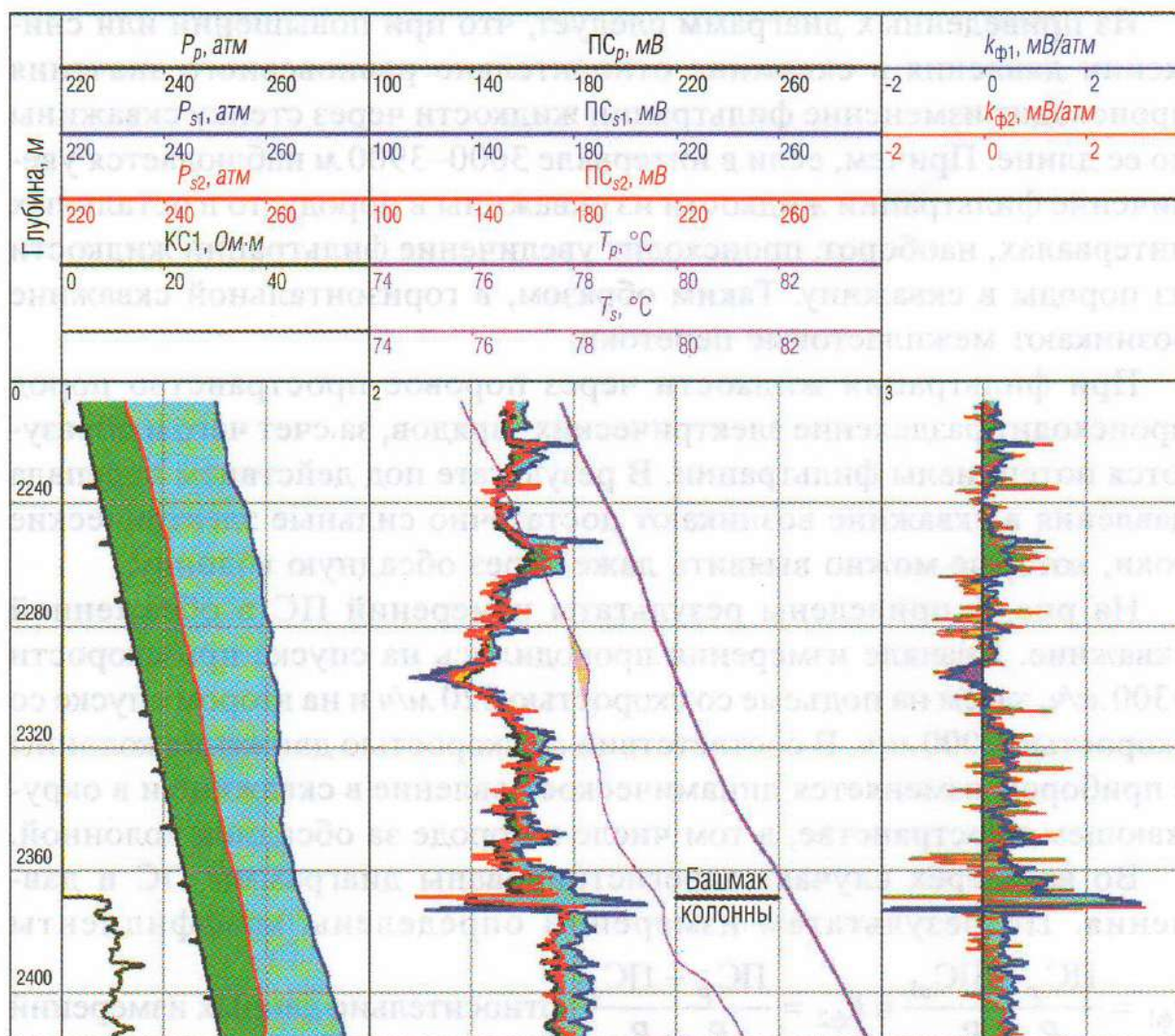


Рис. 6. Пример измерения ПС через обсадную колонну

На рис. 8 приведен еще один пример выявления заколонного перетока из-за негерметичности обсадной колонны.

В процессе спуска буровой колонны с прибором за счет повышения давления в скважине промывочная жидкость проникает в затрубное пространство и задавливается в породу, что отмечается по диаграммам изменения температуры и $k_{ф1}$. В открытом стволе скважины наблюдаются межпластовые перетоки. При этом в интервале 2490–2560 м выделяется зона трещин, наиболее крупные из которых четко видны на диаграммах температуры и резистивиметрии. Отметим, что при измерениях на подъеме никаких аномалий в диаграммах термометрии и резистивиметрии не отмечается.

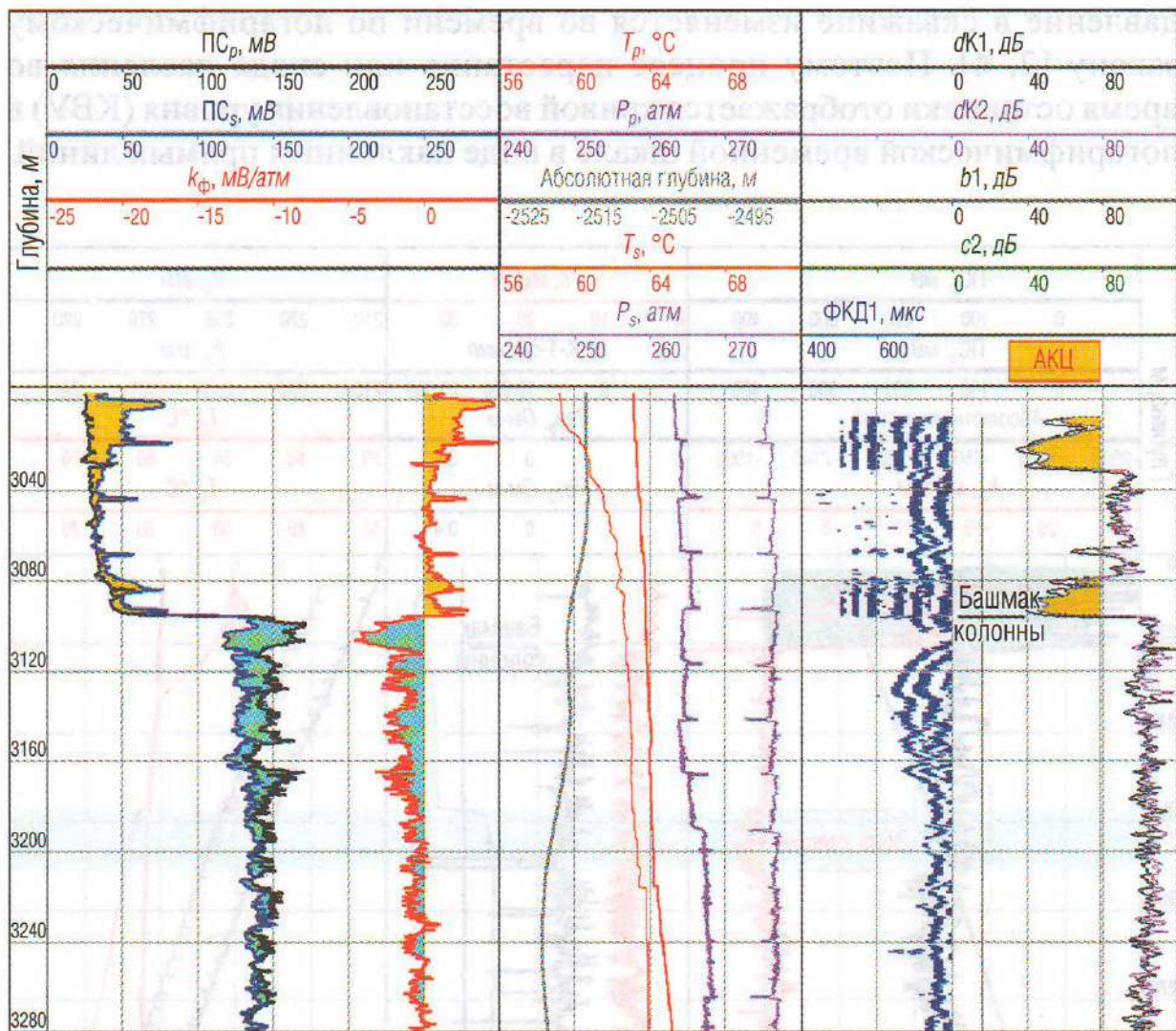


Рис. 7. Сопоставление результатов измерений ПС и АКЦ

При спуске (подъеме) каждой свечи бурового инструмента происходит периодическое повышение (понижение) уровня жидкости и давления в скважине, а во время стоянки уровень жидкости в скважине стремится к своему равновесному состоянию. За счет этого возникают процессы, аналогичные свабированию.

На рис. 9 приведен пример исследования наклонной скважины с хорошей изоляцией обсадной колонны. Здесь же приведены диаграммы изменения давления при спуске и подъеме бурового инструмента. После спуска (подъема) очередной свечи за счет радиальной фильтрации жидкости через цилиндрическую стенку скважины происходит восстановление уровня жидкости до равновесного значения, при этом

давление в скважине изменяется во времени по логарифмическому закону [2, 4]. Поэтому процесс нарастания или спада давления во время остановки отображается кривой восстановления уровня (КВУ) в логарифмической временной шкале в виде наклонных прямых линий.

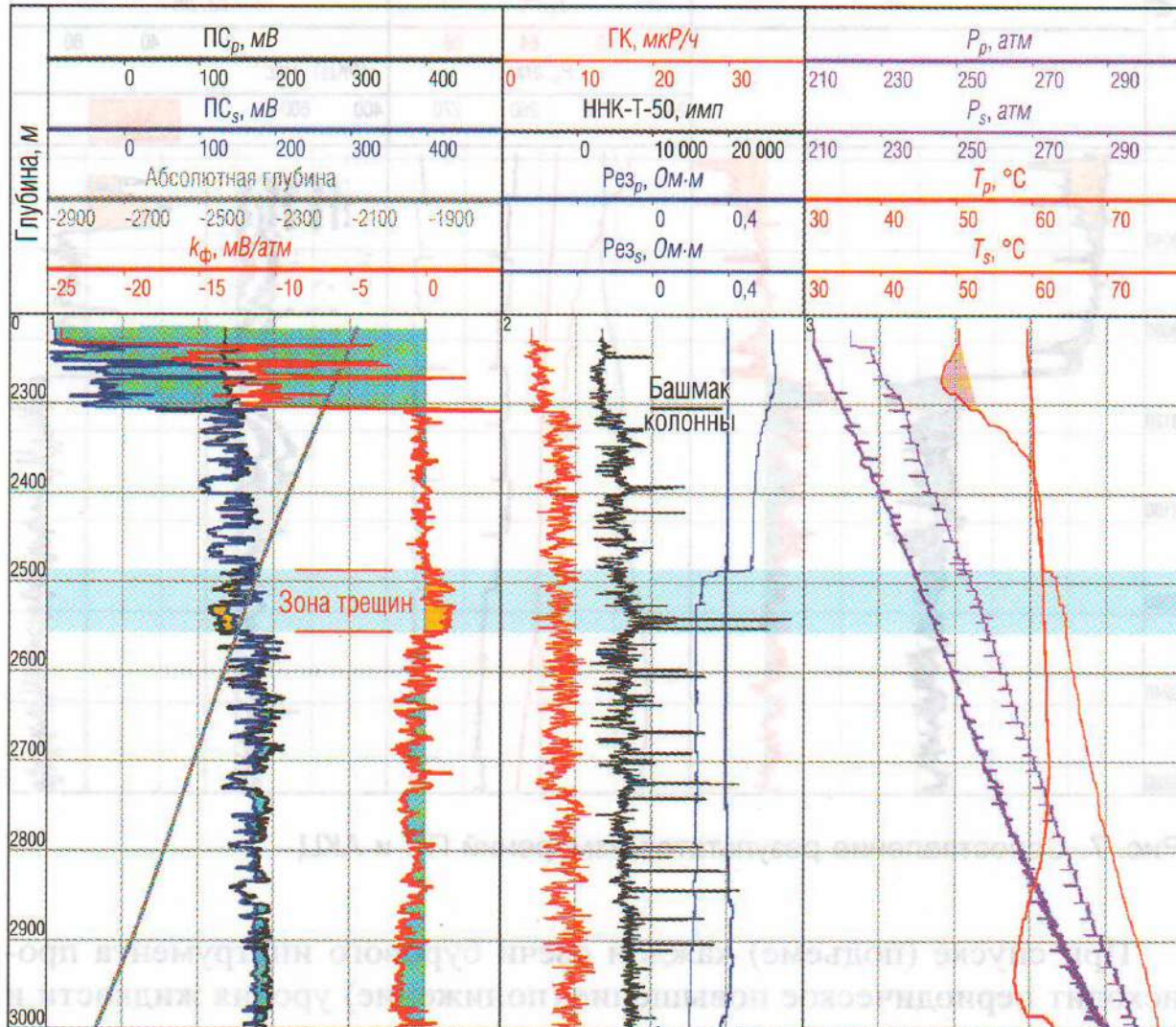


Рис. 8. Пример выявления заколонного перетока и системы трещин

На рис. 10 приведен пример исследования скважины, где кривые восстановления уровня во время стоянки существенно отклоняются от прямой линии. Это можно объяснить наличием трещины на глубине 2940 м.

При спуске бурового инструмента с прибором часть бурового раствора задавливается в трещину и фильтруется через плоскую

поверхность ее стенок, а остальная часть вытесняется, из-за чего повышается уровень жидкости в скважине. После спуска очередной свечи бурового инструмента во время стоянки уровень жидкости в скважине снижается за счет фильтрации через трещину, место которой четко отмечается по данным резистивиметра. При этом за счет наличия трещины уровень жидкости в скважине уменьшается уже не по логарифмическому, а по линейному закону, что и видно на диаграмме давления на спуске.

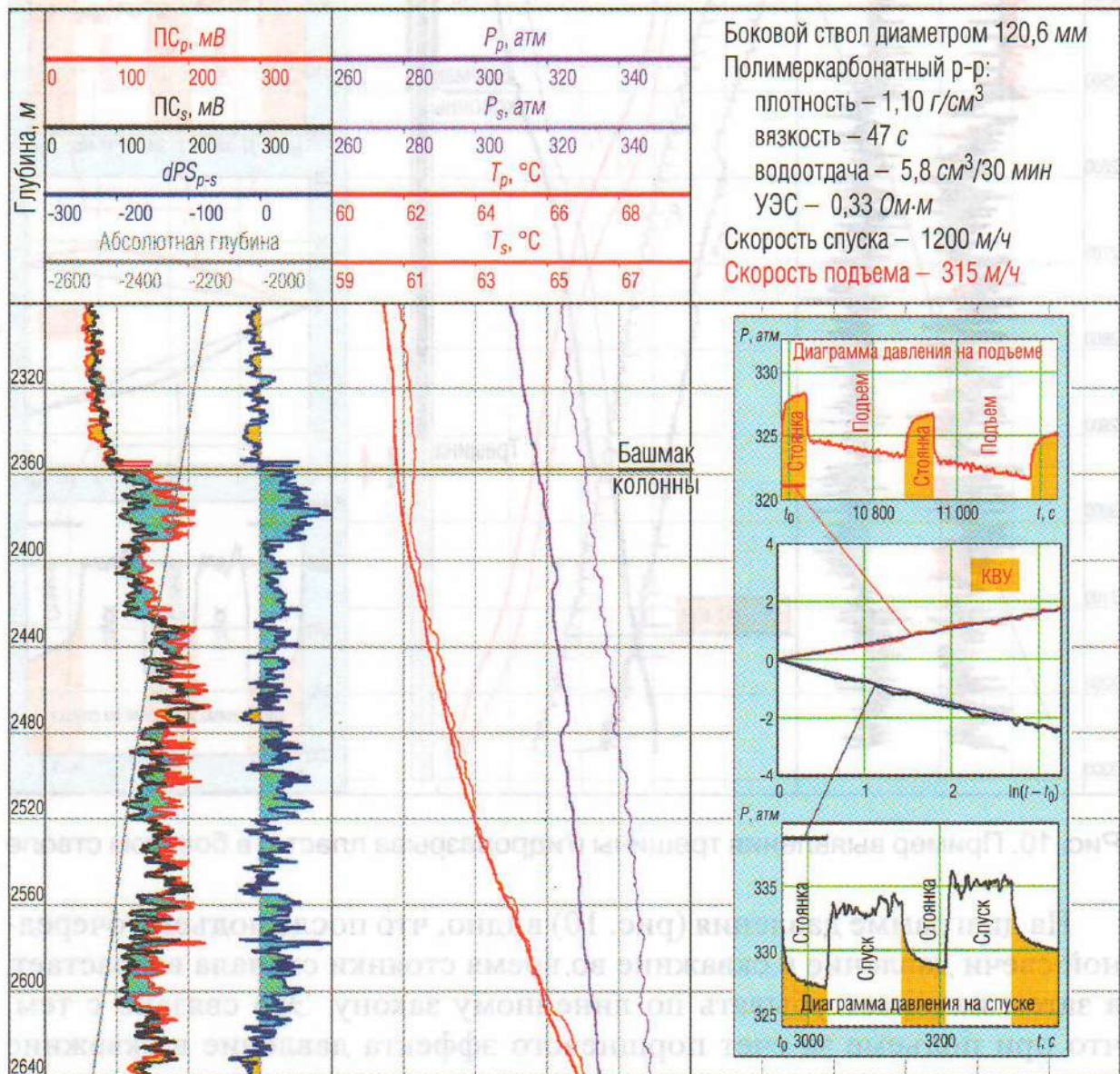


Рис. 9. Кривые восстановления уровня при фильтрации жидкости через стенку скважины

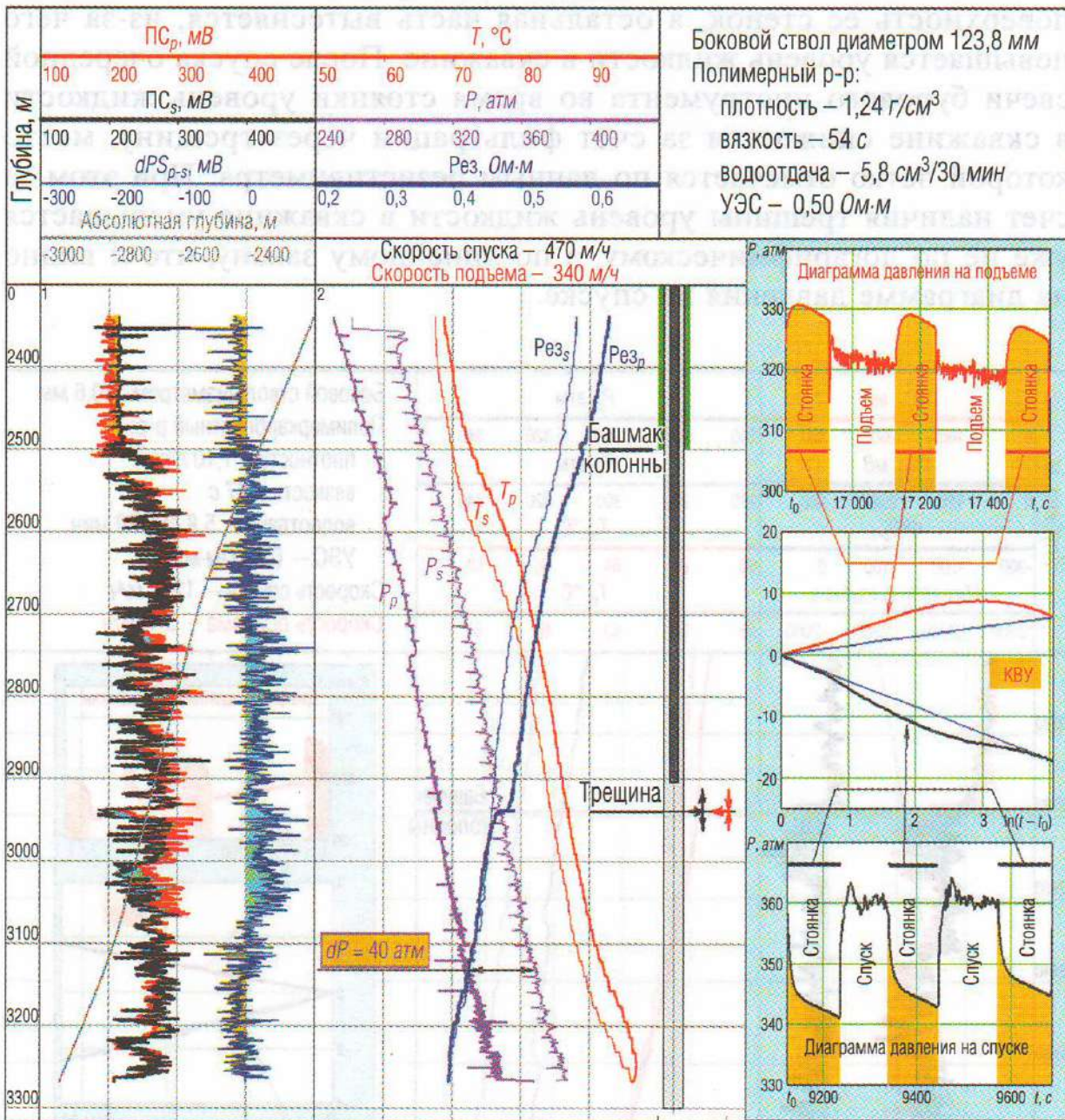


Рис. 10. Пример выявления трещины (гидроразрыва пласта) в боковом стволе

На диаграмме давления (рис. 10) видно, что после подъема очередной свечи давление в скважине во время стоянки сначала возрастает, а затем начинает убывать по линейному закону. Это связано с тем, что при подъеме за счет поршневого эффекта давление в скважине становится меньше пластового и через трещину из пласта в скважину втекает значительное количество жидкости. Во время стоянки приток жидкости сначала прекращается, а затем за счет избыточного

давления начинается обратный процесс, при котором жидкость через трещину поступает в пласт и ее уровень начинает снижаться по линейному закону.

Из рис. 10 видно, что во время каротажа при спуске и подъеме бурового инструмента со скоростью 350–450 м/ч в скважине возникает перепад давления порядка 40 атм. Если учесть, что при обычных спускоподъемных операциях в процессе бурения скважины буровой инструмент перемещается со скоростью 1000–1200 м/ч, то перепады давления в скважине при смене направления движения могут достигать 100 атм и более. А это уже сопоставимо с давлениями, при которых происходит гидроразрыв пласта. Вполне возможно, что в рассматриваемом случае трещина имеет не естественное, а искусственное происхождение.

В данной скважине, несмотря на значительную разность давлений при спуске и подъеме, отличие в диаграммах ПС очень небольшое, то есть радиальная фильтрация жидкости через цилиндрическую стенку скважины значительно меньше, чем через трещину.

Геофизические исследования горизонтальных скважин и боковых стволов часто проводятся расширенным комплексом методов, в том числе с использованием метода акустического каротажа. В результате обработки данных АКЦ, полученных на спуске и подъеме в интервале обсадной колонны, было выявлено, что величина зазора между обсадной колонной и цементным кольцом меняется в зависимости от давления в скважине. Чем больше давление в скважине, тем меньше зазор, а при уменьшении давления в скважине величина зазора увеличивается.

На рис. 11 приведен пример, где это проявляется в динамике. Между обсадной колонной и цементным кольцом имеется зазор, который при определенном давлении перекрывается в районе башмака обсадной колонны.

В процессе подъема бурового инструмента по диаграмме изменения давления на стоянке регистрируется КВУ жидкости в скважине при одновременной фильтрации через цилиндрическую стенку скважины в открытом стволе и через зазор между обсадной колонной и цементным кольцом в обсаженном стволе скважины. За счет этого КВУ несколько отличается от логарифмической зависимости.

При измерении на спуске зарегистрирована диаграмма давления, по которой можно судить о гидродинамических процессах в

скважине. Сразу после начала спуска очередной свечи давление в скважине увеличивается и начинается фильтрация жидкости через цилиндрическую стенку скважины в открытом стволе и через зазор между обсадной колонной и цементным кольцом в обсаженном стволе скважины. По достижении определенного давления перекрывается зазор между обсадной колонной и цементным кольцом в районе башмака, при этом дальше фильтрация жидкости происходит только через цилиндрическую стенку скважины в открытом стволе, уровень жидкости в скважине повышается и давление возрастает по логарифмическому закону.

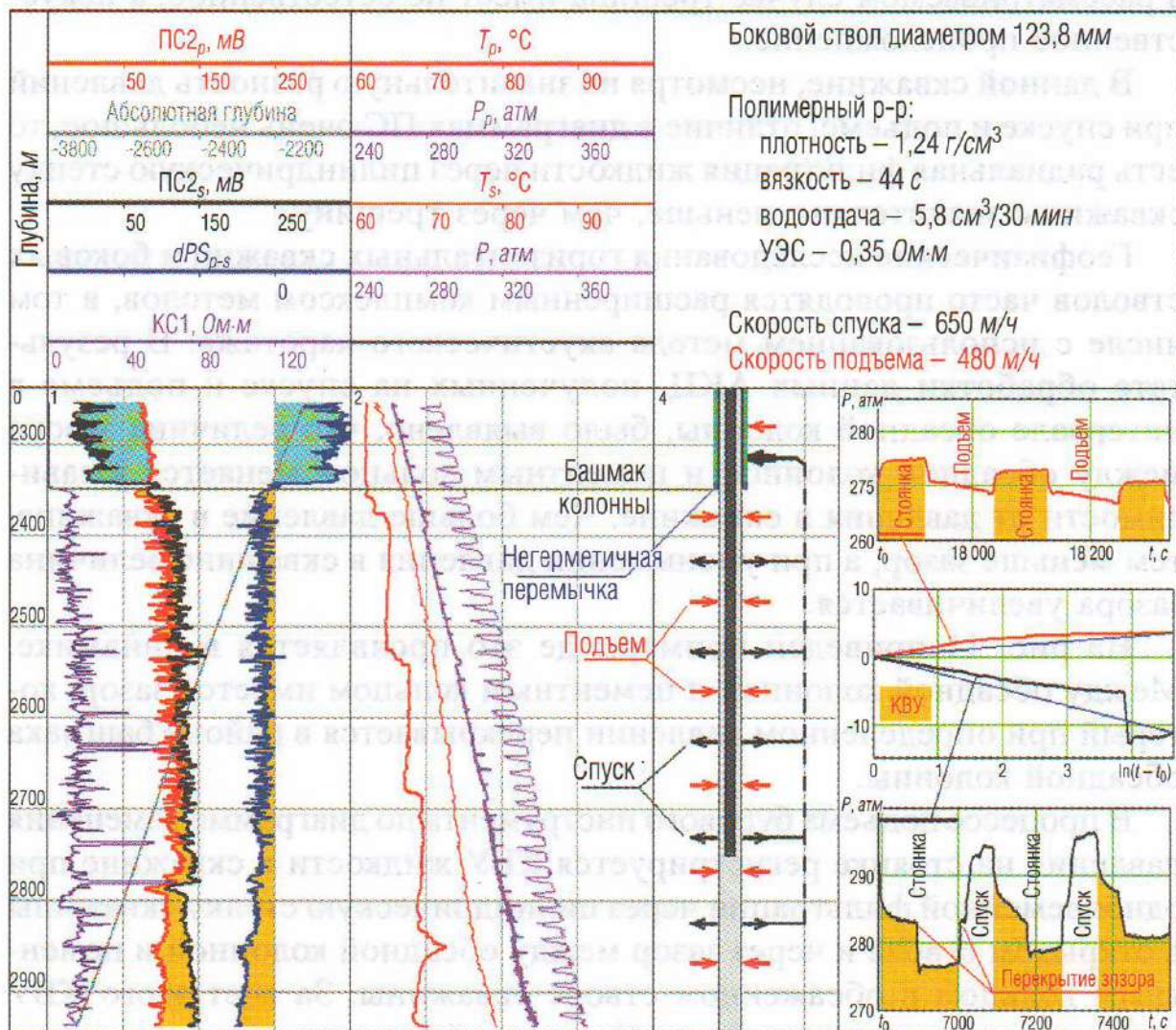


Рис. 11. Выявление заколонного перетока и изменяющегося зазора колонна-цемент в районе башмака по кривой восстановления уровня

Во время стоянки, с момента прекращения движения прибора, уровень жидкости в скважине начинает падать, а давление уменьшается по логарифмическому закону (отрезок прямой линии на КВУ). После снижения давления до определенной величины открывается зазор между обсадной колонной и цементным кольцом, после чего уровень жидкости в скважине быстро падает до равновесного значения.

В заключение отметим, что материалы, изложенные в данной статье, получены на разных месторождениях в отдельных осложненных скважинах, где во избежание холостых СПО по просьбе заказчика исследования проводились на спуске, а затем на подъеме. Для выработки каких-либо методических рекомендаций необходим системный подход при исследовании горизонтальных скважин и боковых стволов с использованием геофизической информации, полученной в различных геолого-технических условиях, в том числе при спуске и подъеме автономной аппаратуры на бурильных трубах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интерпретация результатов геофизических исследований нефтяных и газовых скважин: Справочник / Под ред. В. М. Добрынина. М.: Недра, 1988. 476 с.
2. *Ипатов А. И., Кременецкий М. И.* Геофизический и гидродинамический контроль разработки месторождений углеводородов. М.: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика"; Институт компьютерных исследований, 2006. 780 с.
3. *Сковородников И. Г.* Геофизические исследования скважин: Учебное пособие. 3-е изд., переработ. и дополн. Екатеринбург: Институт испытаний, 2009. 471 с.
4. *Хайруллин М. Х., Хисамов Р. С., Шамсиев М. Н. и др.* Интерпретация результатов гидродинамических исследований скважин методами регулязации. М.–Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика"; Институт компьютерных исследований, 2006. 172 с.

*Рукопись статьи рассмотрена на НТС АМК "ГОРИЗОНТ"
и рекомендована к публикации*