

На правах рукописи



МУХУТДИНОВ ВАДИМ КАСЫМОВИЧ

**РАЗВИТИЕ ТЕРМОМЕТРИИ И ТЕРМОДЕБИТОМЕТРИИ
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН**

01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2017

Работа выполнена на кафедре геофизики ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет».

Научный руководитель: **Назаров Василий Федорович**
доктор технических наук, доцент

**Официальные
оппоненты:** **Федоров Константин Михайлович**
доктор физико-математических наук,
профессор, ФГАОУ ВО «Тюменский
государственный университет», директор
физико-технического института

Гильмиев Денис Рустамович
кандидат физико-математических наук,
ООО «Тюменский Нефтяной Научный Центр»

Ведущая организация: ООО «БашНИПИнефть»

Защита состоится «25» мая 2017 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.274.10 при ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. 410.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» и на сайте университета: <https://diss.utmn.ru/sovet/diss-sovet-212-274-10/zashchita/297798/>

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.274.10
д.ф.-м.н.

Удовиченко С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Разработка нефтяных месторождений в отрасли осуществляется с поддержанием пластового давления путём закачки воды в разрабатываемые пласты через нагнетательные скважины. Впервые закачку воды осуществили на Туймазинском месторождении в 1948г. На начальном этапе закачивали пресную воду непосредственно по эксплуатационной колонне, а затем начали закачивать через НКТ и сточную высокоминерализованную воду, добываемую попутно с нефтью. В настоящее время доля пресной воды в общем объёме закачиваемой воды составляет единицы процента.

Большие объёмы и высокие давления закачки, коррозия эксплуатационной колонны, естественное старение цементного камня приводят к нарушению герметичности обсадной колонны в нагнетательных скважинах. В результате этого возникают заколонные перетоки закачиваемой воды, приводящие к неконтролируемому заводнению не разрабатываемых пластов, снижается эффективность разработки нефтяных месторождений. Кроме того, на некоторых месторождениях наблюдается осолонение пресноводных горизонтов. Поэтому задача контроля технического состояния обсадной колонны в нагнетательных скважинах является очень важной как с точки зрения эффективности разработки месторождения, так и с экологической точки зрения.

Изучением тепловых процессов в скважине и пласте занимались многие исследователи – Л.И. Рубинштейн, Э.Б. Чекалюк, Н.Н. Непримеров, А.И. Филиппов, А.Ш. Рамазанов, А.И. Марков, М.А. Пудовкин, А.Х. Галин, А.И. Саламатин и др. Однако в этих работах рассматривались задачи при закачке воды в нагнетательную скважину при условии, что обсадная колонна герметична. Распределение температуры вдоль ствола скважины при закачке жидкости в скважину с нарушенной герметичностью эксплуатационной колонны впервые исследуется в работах В.Ф. Назарова и Д.Б. Зайцева (2002). В работе В.Ф. Назарова не учитывался радиальный градиент температуры в потоке закачиваемой воды, а в работе Д.Б. Зайцева рассматривались только ламинарные потоки. Поэтому необходимо дальнейшее теоретическое изучение тепловых полей при закачке, а также разработка технологии исследования нагнетательных скважин с целью повышения однозначности заключений о состоянии обсадной колонны в нагнетательной скважине является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является повышение информативности и достоверности решения задачи по определению места нарушения герметичности обсадной колонны выше воронки НКТ в нагнетательной скважине на основе теоретических и экспериментальных исследований температурных полей в системе скважина-пласт, разработки методики определения количества воды, поглощаемой в месте нарушения герметичности колонны по измерениям термодобитомером.

Основные задачи исследований:

1. Анализ литературных источников при определении герметичности обсадной колонны в нагнетательных скважинах.
2. Разработка математической модели теплопереноса в системе скважина-пласт в процессе закачки воды в нагнетательную скважину с нарушенной и не нарушенной герметичностью обсадной колонны выше воронки НКТ.
3. Изучение влияния конструкции термометра на результаты измерений температуры в скважине.
4. Разработка технологии измерений термодобитомером при определении скорости потока жидкости в скважине, внедрение разработанных методик на месторождениях ОАО «Сургутнефтегаз» и ПАО «Татнефть» при определении герметичности обсадной колонны в нагнетательных скважинах в интервале, перекрытом НКТ.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

1. Выявлены признаки герметичности обсадной колонны в интервале, перекрытом лифтовыми трубами, по измерениям термометром внутри НКТ.
2. Доказано, что зависимость показаний СТД от скорости протяжки прибора описывается колоколообразной кривой. Эту зависимость можно получить как непосредственно путём измерения термодобитомером с переменной скоростью протяжки прибора, так и в результате построения кривой по данным серии измерений термодобитограмм с различными постоянными скоростями.
3. Выявлено, что максимальная чувствительность метода СТД может быть достигнута только в том случае, когда направление движения термодобитомера совпадает с направлением потока закачиваемой воды в скважине.

Основные защищаемые научные положения.

1. Результаты теоретических, экспериментальных и промышленных исследований выявления герметичности обсадной колонны в нагнетательных скважинах в интервале, перекрытом НКТ.
2. Критерии эффективности термометрии при определении нескольких мест нарушения герметичности колонны в скважине.
3. Новый способ измерений термометром в нагнетательных скважинах, обеспечивающий повышение однозначности заключения о техническом состоянии обсадной колонны выше воронки НКТ.
4. Методика определения скорости потока жидкости в нагнетательной скважине и выявление герметичности обсадной колонны выше воронки НКТ по измерениям термодобитомером с переменной скоростью протяжки прибора.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается использованием фундаментальных уравнений тепло - и массопереноса, физической и математической непротиворечивостью построенных моделей общим гидродинамическим и термодинамическим представлениям, математической строгостью методов решения и согласованностью результатов, полученных различными способами.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

Разработанные автором технологии исследования термометром позволяют повысить однозначность заключений о техническом состоянии обсадной колонны нагнетательных скважин в интервале, перекрытом НКТ, сокращают продолжительность работ на проведение геофизических исследований, не нарушают технологический режим работы скважины. Эти технологии внедрены при исследовании нагнетательных скважин в ПАО «Татнефть». В этом объединении выдают величину приёмистости скважины по измерениям каналом СТД. В отличие от механического расходомера на показания СТД не оказывают влияние механические примеси, содержащиеся в потоке закачиваемой воды.

Кроме того, разработана новая технология проведения измерений каналом термодобитомера в нагнетательных скважинах. Эта технология внедрена в ПАО «Татнефть».

Личный вклад автора заключается в постановке задач, проведении и анализе результатов расчётов, обсуждении и составлении как технологии проведения исследований в нагнетательных скважинах ОАО «Сургутнефтегаз» и ПАО «Татнефть», а также при интерпретации их результатов при определении герметичности обсадной колонны и НКТ.

Апробация результатов и публикации. Основное содержание и результаты работы докладывались и обсуждались на:

- VII Конгрессе нефтегазопромышленников России. (Уфа, 2007);
- XIX Научно-практическая конференция «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин», в рамках XVI Международной специализированной выставки «Газ. Нефть. Технологии 2008». (Уфа, 2008);
- VI Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и её приложения в естествознании» (Уфа, 2013);
- Восьмой молодёжной научно-практической конференции. Повышение эффективности геологоразведочных работ. (Уфа, 2013);
- XIX Научно-практической конференции «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин». Тезисы докладов конференции в рамках XXI Международной специализированной выставки «Газ. Нефть. Технологии 2013». (Уфа, 2013);
- Юбилейной XX Научно-практической конференции «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин» посвященной 50-летию кафедры «Геофизика» Башкирского государственного университета в рамках XXII Международной специализированной выставки «Газ. Нефть. Технологии 2014». (Уфа, 2014).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 18 научных работах, включая 1 патент РФ и 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объём работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитированной литературы. Общий объём работы составляет 156 страниц машинописного текста, включая 56 рисунков и список использованной литературы из 115 наименований.

Автор выражает благодарность своему руководителю за внимание к работе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована её актуальность, поставлена цель и сформулированы задачи исследования, научная новизна, защищаемые научные положения и показана практическая значимость.

Первая глава посвящена анализу результатов исследований, проведённых различными геофизическими методами при определении герметичности обсадной колонны в нагнетательных скважинах. Из рассмотренных материалов следует, что в настоящее время для определения герметичности НКТ и обсадной колонны используются потокометрические методы исследования скважин – термометрия, механическая и термокондуктивная дебитометрия. Из этих методов на практике наибольшее распространение получила термометрия. Было разработано много методик приведения измерений термометром в скважинах для определения технического состояния обсадной колонны. Одним из первых при решении рассматриваемой задачи был способ продавки, разработанный В.Н. Дахновым и Д.И. Дьяконовым. В этом способе проводили два измерения термометром вдоль ствола скважины: первое - в простаивающей длительное время, второе – через небольшой промежуток времени после прекращения закачки какого-то количества жидкости. По сопоставлению результатов этих измерений определяли место нарушения герметичности колонны. Авторы этого способа указывали, что можно определить место нарушения герметичности колонны, если оно одно в скважине. Этот недостаток был устранён после того, как В.Ф. Назаров предложил проводить интерпретацию сначала разностной кривой, а затем (при необходимости) рассматривать исходные термограммы. Разностная термограмма строится на исходных термограммах при вычитании одной термограммы из другой. Кроме того, в новом способе обработки и интерпретации предлагается ввести в комплекс исследований – это измерения манометром, для исключения влияния аномалии температуры, связанной с уровнем жидкости в скважине. Эффективность новой методики обработки и интерпретации результатов измерений термометром обусловлена тем, что на разностную термограмму оказывает влияние только изменение скорости потока закачиваемой жидкости, а влияние горных пород исключается. Однако эта методика имеет и недостатки. Связано это с тем, что по этой методике можно выявлять утечки жидкости через обсадную колонну только в интервале отсутствия НКТ.

Измерения термометром при закачке, а также при изливе воды из скважины были ограничены экранирующим влиянием НКТ при определении нарушения герметичности обсадной колонны в интервале, перекрытом НКТ. При определении герметичности НКТ или обсадной колонны выше интервалов перфорации, но в свободной от НКТ части нагнетательной скважины, эффективность измерений термометром при закачке определяется скоростью потока ниже места нарушения герметичности. Если режим течения турбулентный ниже нарушения герметичности колонны, то изменение градиента температуры в месте нарушения герметичности, практически, не отмечается на измерении термометром при закачке воды в скважину. По измерениям термометром при закачке чётко отмечается место нарушения герметичности обсадной колонны в зумпфе скважины.

Определить место нарушения герметичности НКТ по одному измерению термометром при изливе воды из скважины невозможно, так как на измеряемую температуру в НКТ оказывает влияние как НКТ, так и межтрубное пространство. Кроме того, аномалии калориметрического смешивания в интервале нарушения герметичности НКТ не будет, если температура восходящего и поступающего потоков в НКТ будут равны между собой. Следующим ограничением измерения термометром при изливе является то, что невозможно отделить случай нарушения герметичности НКТ от нарушения герметичности обсадной колонны.

Для определения герметичности обсадной колонны выше воронки НКТ по измерениям термометром либо в остановленной скважине, либо при ограниченной закачке или изливе воды из скважины через НКТ, разработана так называемая методика временной фильтрации температурных аномалий. Суть этой методики заключается в том, что при кондуктивном теплопереносе время регистрации аномалии температуры зависит от расстояния между источником потока воды и датчиком температуры. При увеличении этого расстояния увеличивается время регистрации аномалии температуры. Однако, у имеющихся в отрасли скважинных комплексных приборов конструкция такова, что тепло в радиальном направлении распространяется в некоторых случаях за счёт конвективной теплопроводности. Это исключает возможность использования методики временной фильтрации температурных аномалий при определении герметичности НКТ и обсадной колонны выше воронки НКТ.

Ограничены в применении методы механической и термокондуктивной дебитометрии с целью определения герметичности обсадной колонны при проведении измерений через НКТ. Метод термокондуктивной дебитометрии не информативен при определении герметичности колонны в интервале больших скоростей потока жидкости в скважине. В этих случаях большим изменениям скорости потока жидкости в скважине соответствуют небольшие (на уровне флюктуаций прибора) приращения показаний термодебитомера. Этот метод геофизики переименовали из скважинного термокондуктивного дебитомера (СТД) в скважинный термокондуктивный индикатор притока/расхода жидкости в скважине.

Во второй главе приведены результаты расчётов распределения температуры вдоль ствола нагнетательной скважине при закачке воды через НКТ для трёх случаев: 1. нарушена герметичность НКТ; 2. нарушена герметичность обсадной колонны выше воронки НКТ; 3. нарушена герметичность обсадной колонны выше воронки НКТ на двух глубинах. Кроме того, проведены расчёты распределения температуры с целью изучения радиального градиент температуры в потоке закачиваемой воды в нагнетательную скважину. По каждой задаче проведён анализ результатов расчётов. Ниже приведена математическая постановка первой задачи.

При решении всех задач рассматривается цилиндрическая система координат (φ, r, z) . Проводится закачка воды в нагнетательную скважину через НКТ. Ось Oz совпадает с осью НКТ и эксплуатационной колонны. Начало координат по оси Oz находится на глубине нейтрального температурного слоя Земли. Насосно-компрессорные трубы спущены в скважину до глубины $z = H$. В первой задаче предполагается, что на глубине $z = H_1$ нарушена герметичность НКТ. Скорость потока закачиваемой воды в НКТ выше места нарушения герметичности НКТ составляет V_1^1 , а ниже V_1^2 . Скорость воды в межтрубном пространстве выше места нарушения герметичности НКТ равна 0, а ниже - V_2^1 . Вскрытые перфорацией пласты находятся на глубине $z > H$, то есть вне рассматриваемой в задаче области. Начальная температура в НКТ, в межтрубном пространстве и в породе описывается одной и той же зависимостью - $T_0 + \Gamma z$. Здесь Γ – геотермический градиент температуры, T_0 – температура нейтрального слоя Земли. Температура закачиваемой воды на устье равна $T_1(r, 0, t) = T_{ЗАК}$.

При таких предположениях математическая постановка задачи об осесимметричном тепловом поле при закачке жидкости в скважину через НКТ будет следующая:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} + V_1 z \frac{\partial T_1}{\partial z} = a_1^2 \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right], 0 \leq r \leq R_{НКТ}, 0 \leq z \leq H, t > 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} + V_2 z \frac{\partial T_2}{\partial z} = a_2^2 \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right], R_{НКТ} \leq r \leq R_K, 0 \leq z \leq H, t > 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = a_3^2 \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right], R_K \leq r \leq \infty, 0 \leq z \leq H, t > 0 \quad (3)$$

$$T_1|_{t=0} = T_2|_{t=0} = T_3|_{t=0} = T_0 + \Gamma \cdot z \quad (4)$$

$$T_1|_{z=0} = T_{ЗАК}, T_2|_{z=0} = T_3|_{z=0} = T_0 \quad (5)$$

$$\frac{dT_1}{dz} \Big|_{z=H} = 0 \quad (6)$$

$$T_2 \Big|_{z=H_1} = \frac{2}{R_{НКТ}^2} \int_0^{R_{НКТ}} r T_1 \Big|_{z=H_1} dr, R_{НКТ} \leq r \leq R_K \quad (7)$$

$$T_2 \Big|_{z=H_1-0} = T_2 \Big|_{z=H_1+0} \quad (8)$$

$$\frac{dT_1}{dz} \Big|_{z=H_1-0} = \frac{dT_2}{dz} \Big|_{z=H_1+0} \quad (9)$$

$$T_2|_{z=H} = T_0 + \Gamma \cdot H \quad (10)$$

$$T_1|_{r=R_{\text{НКТ}}} = T_2|_{r=R_{\text{НКТ}}}, \quad \frac{\partial T_1}{\partial r}|_{r=R_{\text{НКТ}}} = \frac{\partial T_2}{\partial r}|_{r=R_{\text{НКТ}}} \quad (11)$$

$$T_2|_{r=R_K} = T_3|_{r=R_K}, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}|_{r=R_K} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}|_{r=R_K} \quad (12)$$

$$\frac{dT_1}{dr}|_{r=0} = 0 \quad (13)$$

$$T_3|_{r \rightarrow \infty} = T_0 + \Gamma \cdot z \quad (14)$$

$$V_1 \text{ (НКТ)} \Rightarrow \begin{cases} V_1^1, & 0 \leq z < H_1 \\ V_1^2, & H_1 < z \end{cases} \quad (15)$$

$$V_2 \text{ (межтрубное пространство)} \Rightarrow \begin{cases} 0, & 0 \leq z < H_1 \\ V_2^1, & H_1 < z \end{cases} \quad (16)$$

Здесь T_i - температура; V_1 и V_2 - скорости потока воды в НКТ и межтрубном пространстве; a_i^2 и λ_i - коэффициенты температуропроводности и теплопроводности среды; Γ - геотермический градиент. Индекс $i=1$ соответствует области $0 \leq r \leq R_{\text{НКТ}}$, $0 \leq z \leq H$; $i=2$ - $R_{\text{НКТ}} \leq r \leq R_K$, $0 \leq z \leq H$; $i=3$ - $R_K \leq r < \infty$, $0 \leq z \leq H$, где $R_{\text{НКТ}}$ и R_K - радиусы НКТ и колонны соответственно.

На рис.1 приведена геометрия по всем четырём задачам. Так на рис.1а приведена геометрия по задаче 1, на рис.1б - геометрия по задаче 2, на рис.1в - геометрия по задаче 3, на рис.1г - геометрия по задаче 4.

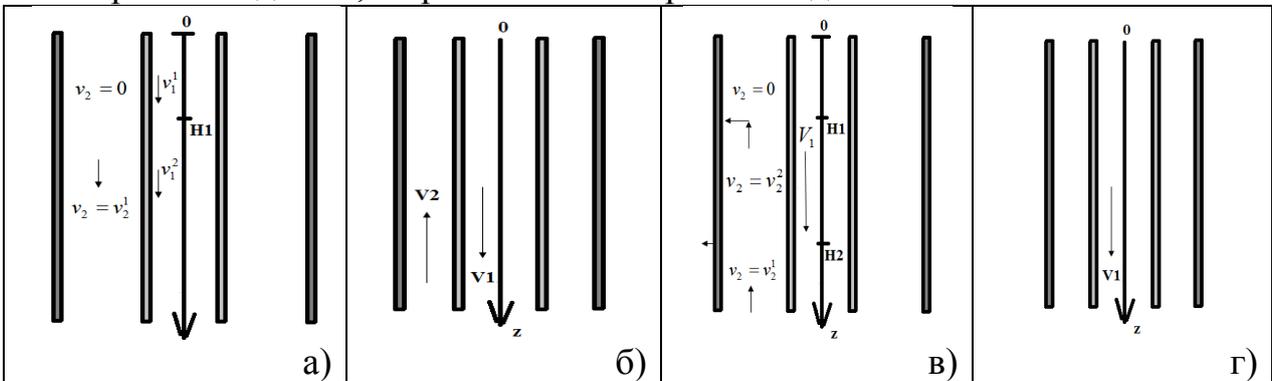


Рис.1. Геометрия всех задач.

Задача (1)-(16) решается численно методом сеток. Область интегрирования отсекается по r . Уравнение (14) рассматривается лишь в области $0 \leq r \leq R$, где R достаточно велико, чтобы можно было считать, что (14) выполняется с нужной точностью при замене $r \rightarrow \infty$ на $r=R$. Разностные схемы строятся методом баланса. Полученная система линейных уравнений решается методом верхней релаксации. Разработана компьютерная программа. Расчёты проведены при следующих параметрах: температура закачиваемой воды $T_{\text{ЗАК}}=20^\circ\text{C}$; естественная температура пород на глубине $z=0$ есть $T_0=6^\circ\text{C}$;

геотермический градиент $\Gamma=0,017 \text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$; наружный диаметр НКТ $d_{\text{н.НКТ}}=73 \text{ мм}$; внутренний - $d_{\text{в.НКТ}}=63 \text{ мм}$ (толщина стенки НКТ не учитывалась при построении расчётной сетки, но учитывалась при расчёте скорости движения жидкости, зависящей от площади сечения потока в межтрубном пространстве); внутренний диаметр колонны $d_{\text{к}} = 130 \text{ мм}$; длина НКТ $H=1000\text{м}$.

Для проверки адекватности программы проведено тестирование и показана хорошая сходимость результатов расчётов с известными аналитическими и модельными решениями задач при квазистационарном распределении температуры в системе скважина-пласт.

На рис.2. приведены результаты расчётов распределения температуры при закачке с нарушенной герметичностью НКТ.

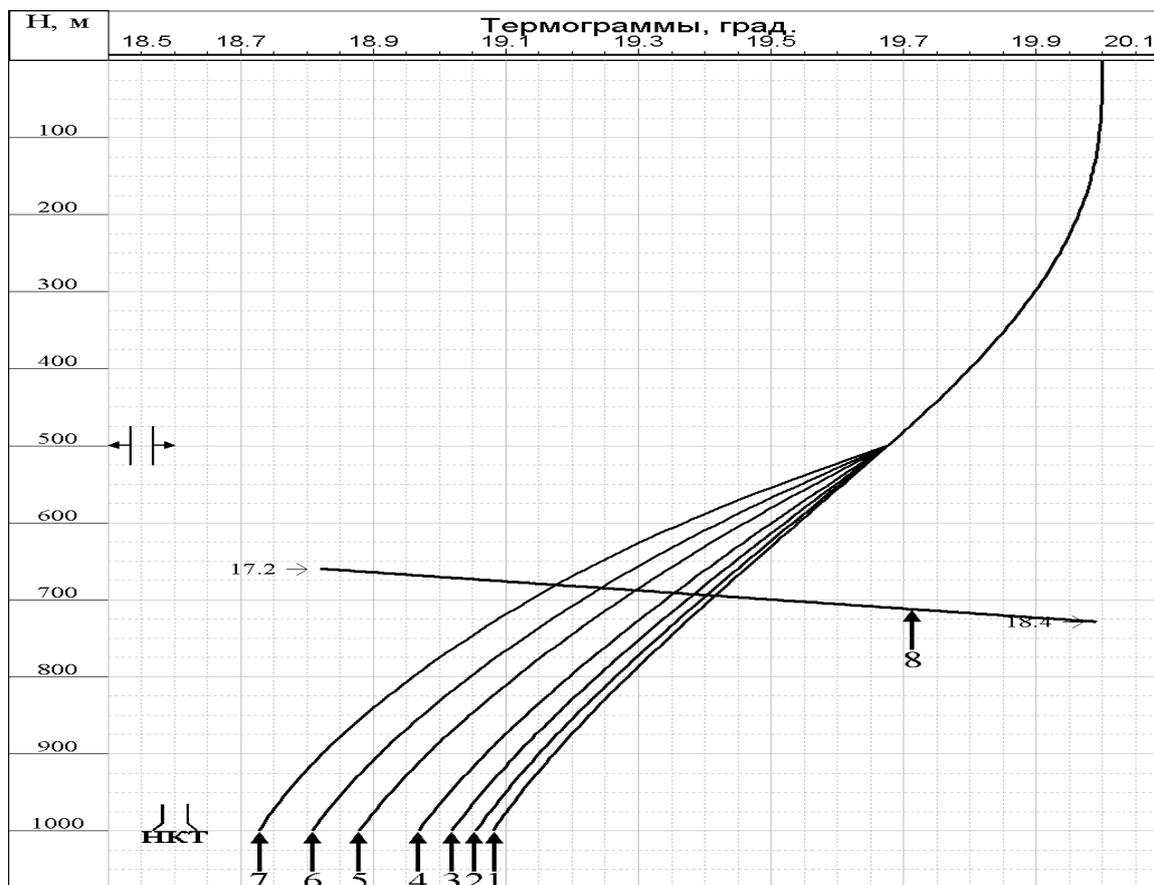


Рис.2. Распределение температуры при закачке с нарушенной герметичностью НКТ.

Шифр кривых означает распределение температуры в потоке закачиваемой воды через НКТ при приёмистости в месте нарушения герметичности НКТ: 1 - $Q=0 \text{ м}^3/\text{сут}$; 2 - $Q=7 \text{ м}^3/\text{сут}$; 3 - $Q=15 \text{ м}^3/\text{сут}$; 4 - $Q=25 \text{ м}^3/\text{сут}$; 5 - $Q=40 \text{ м}^3/\text{сут}$; 6 - $Q=50 \text{ м}^3/\text{сут}$; 7 - $Q=60 \text{ м}^3/\text{сут}$; 8—геотермическое распределение температуры. Приёмистость скважины составляет $Q=100 \text{ м}^3/\text{сут}$. Место нарушения герметичности НКТ находится на глубине 500 м. Как видно из рисунка, при малых нарушениях герметичности место нарушения

герметичности НКТ определить представляет трудности. Только при больших нарушениях, когда через место нарушения уходит более 20% закачиваемой воды проблемное место НКТ определяется скачкообразным изменением градиента температуры.

Во второй задаче изучается распределение температуры при квазистационарном режиме закачки воды в нагнетательную скважину через НКТ при нарушенной герметичности обсадной колонны выше воронки НКТ (в общем случае нарушение находится на устье). Математическая постановка этой задачи такая же, как и в первой задаче, если в ней провести следующее изменение: 1) в уравнении (1) заменить “ $V_1(z)$ ” на “ V_1 ”; 2) в уравнении (2) заменить “ $V_2(z)$ ” на “ $-V_2$ ”; 3) условия (8), (9), (15) и (16) исключить.

В результате расчётов по второй задаче получены важные результаты. Анализ результатов исследований в нагнетательных скважинах на нефтяных месторождениях России показывает, что температура закачиваемой воды вблизи воронки НКТ меньше геотермической. Такие условия в нагнетательной скважине определяются температурой закачиваемой воды на устье, величиной приёмистости, а также геотермическим градиентом. Именно для таких условий были проведены расчёты распределения температуры при закачке воды в нагнетательную скважину.

Из проведённых расчётов следует, что характер распределения температуры вблизи воронки НКТ при закачке воды в нагнетательную скважину через НКТ существенно отличается при герметичной и нарушенной герметичности обсадной колонны выше воронки НКТ. При герметичной колонне выпуклость на кривой направлена от геотермического распределения, а при нарушенной герметичности колонны выше воронки НКТ выпуклость на кривой направлена к геотермическому распределению. Распределение температуры для этих двух случаев приведены на рис.3.

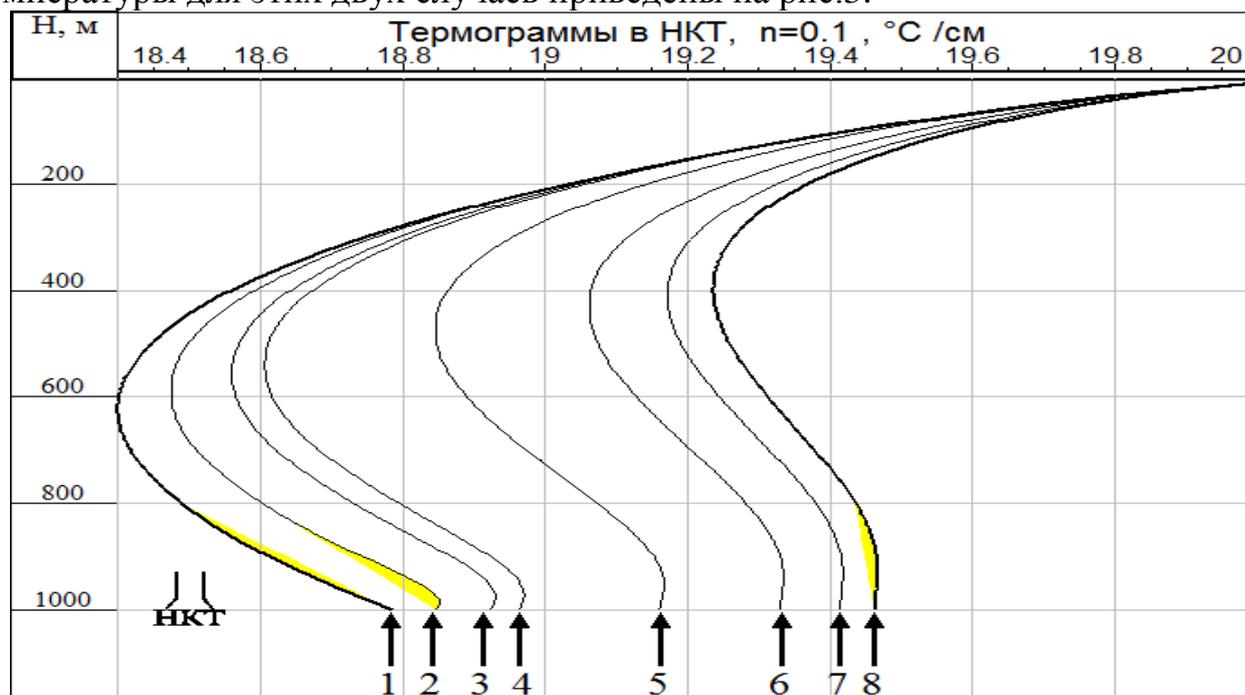


Рис.3. Распределение температуры в НКТ при закачке воды в нагнетательную скважину. Приёмистость скважины составляет $Q=100$ м³/сут скважину.

Для того, чтобы определить герметичность обсадной колонны выше воронки НКТ, надо провести прямую линию, которая соединяла бы две точки на термограмме, одна из этих точек находится на глубине воронки НКТ, а другая – на 20-30м выше воронки НКТ. Если термограмма находится левее этой прямой, то обсадная колонна герметична (в этом случае выпуклость на кривой направлена в сторону противоположную от геотермического распределения), иначе – нарушена герметичность колонны выше воронки НКТ. Такое поведение термограммы при закачке выше воронки НКТ можно использовать на практике для определения герметичности обсадной колонны выше воронки НКТ. При этом надо иметь в виду, что режим закачки воды в нагнетательную скважину должен быть квазистационарным. Если измерение проведено при неустановившемся режиме закачки, то распределение температуры после перевода скважины с остановки под закачку воды в скважину будет иметь выпуклость, направленную к геотермическому распределению. Такая форма кривой будет сохраняться в скважине до тех пор, пока весь столб закачиваемой воды с устья до забоя не будет закачан в перфорированный пласт.

В третьей задаче изучается распределение температуры при закачке воды в нагнетательную скважину через НКТ при нарушенной герметичности обсадной колонны на двух глубинах выше воронки НКТ. Математическая постановка этой задачи будет такая же, как и в первой задаче, если в ней провести следующие изменения: 1) в уравнении (1) заменить “ $V_1(z)$ ” на “ V_1 ”; 2) в уравнении (2) заменить “ $V_2(z)$ ” на “ $-V_2(z)$ ”; 3) условия (8), (9), (15) исключить;

$$4) \text{ условие (16) заменить на } V_2 z = \begin{cases} 0, & 0 \leq z < H_1 \\ V_2^2, & H_1 < z < H_2. \\ V_2^1, & H_2 < z \end{cases}$$

По третьей задаче, когда нарушена герметичность обсадной колонны выше воронки НКТ, определить место нарушения герметичности по измерению термометром при закачке представляет большие трудности даже при небольших приёмыстостях нагнетательной скважине. Поэтому проводить измерения термометром при закачке, не ограничивая её приёмистость, не следует. Кроме того, аномалией температуры отметится не только место нарушения герметичности обсадной колонны, но отметится также и нарушение герметичности НКТ. Для того, чтобы разделить эти два случая между собой нужно использовать как методику временной фильтрации температурных аномалий, так и особенности распределения температуры вблизи воронки НКТ, зарегистрированной при квазистационарном режиме закачки воды через НКТ.

Математическая постановка четвёртой задачи отличается от постановки по первой задаче следующим: 1) в уравнении (1) заменить “ $V_1(z)$ ” на “ V_1 ”; 2) в уравнении (2) удалить “ $V_2(z)$ ”; 3) удалить условия (7) - (9), (15) и (16).

В четвёртой задаче изучается распределение температуры вдоль радиуса в потоке закачиваемой в нагнетательную скважину воды. Показано, что распределение температуры вдоль радиуса не остаётся постоянным. В приустьевой части температура на стенке и на оси скважины мало отличаются

между собой. При увеличении глубины разница температуры воды между стенкой и осью увеличивается, достигает максимальной величины на какой-то глубине, а затем начинает уменьшаться. Причём уменьшение температуры до нуля между различными образующими, проходящими на различном расстоянии от оси, наблюдается на протяжении некоторой области δz . Область δz будем называть областью инверсии распределения температуры вдоль радиуса в потоке закачиваемой воды в скважине. Протяжённость этой области увеличивается при увеличении приёмистости скважины. Так при $Q=20 \text{ м}^3/\text{сут}$ величина $\delta z \approx 75 \text{ м}$, а при $Q=100 \text{ м}^3/\text{сут}$ $\delta z \approx 375 \text{ м}$ (см. рис.4).

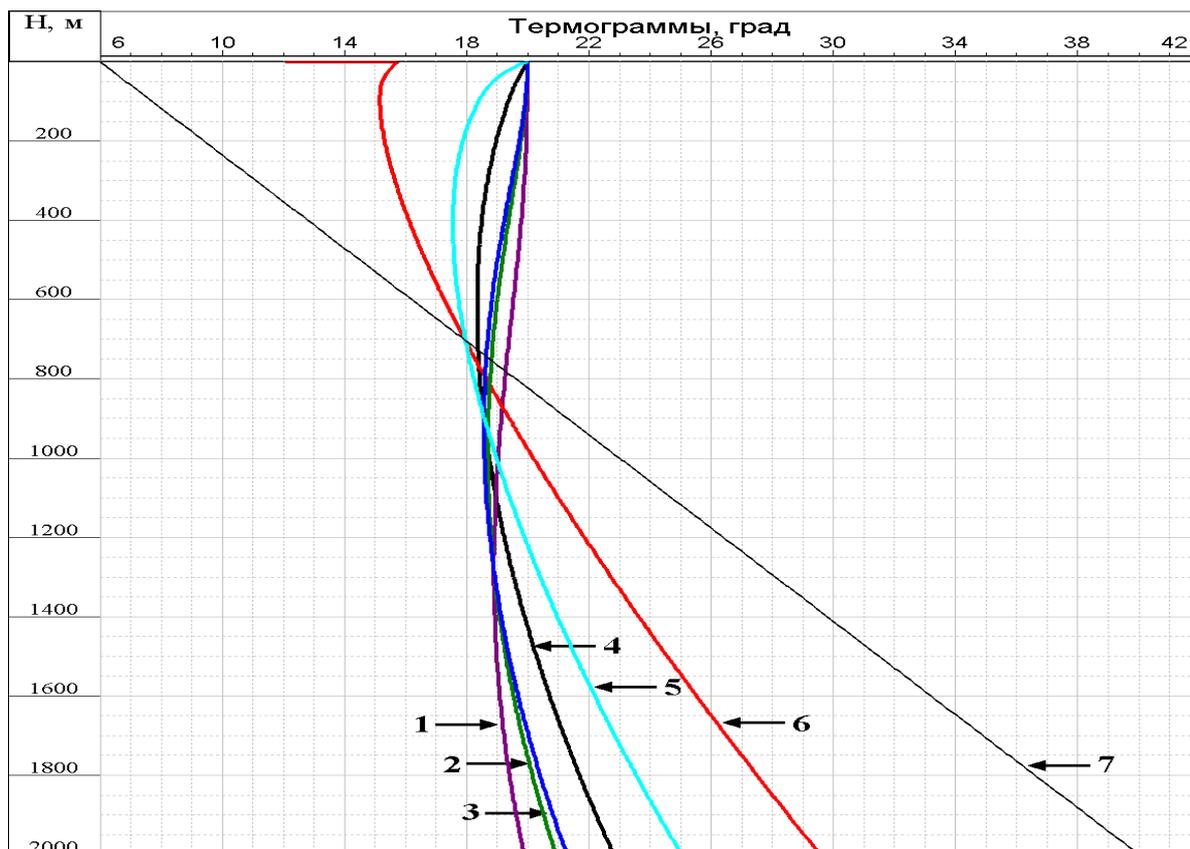


Рис.4. Распределение температуры при закачке воды в нагнетательную скважину с величиной приёмистости $Q=100 \text{ м}^3/\text{сут}$.

При дальнейшем увеличении глубины, считая от области инверсии, разница температуры между стенкой и осью скважины в потоке закачиваемой воды начинает увеличиваться. Вместе с этим изменяется также и знак градиента температуры. Если в приустьевой части скважины градиент температуры отрицательный (температура на оси больше чем на стенке), то ниже области инверсии градиент температуры положительный. Радиальный градиент температуры выше области инверсии составляет десятки $^{\circ}\text{C}/\text{м}$. причём, при уменьшении величины приёмистости скважины градиент температуры увеличивается. Ниже области инверсии радиальный градиент температуры составляет более одной сотни $^{\circ}\text{C}/\text{м}$. Например, при $Q=100 \text{ м}^3/\text{сут}$ величина радиального градиента температуры составляет $\Gamma=150 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

Это можно использовать на практике при определении, например, места нарушения герметичности обсадной колонны или НКТ.

Третья глава посвящена дальнейшему развитию термодобитометрии. На основании физических основ термодобитометрии разработана новая технология проведения измерений каналом термодобитомера в скважинах для определения скорости потока жидкости в нагнетательной скважине. В отличие от известных способов, в новом способе измерение каналом термодобитомера проводится в направлении, совпадающим с направлением потока жидкости в скважине. Для определения скорости потока жидкости измерение термодобитомером проводят с переменной скоростью – либо с ускорением, либо с замедлением. В первом случае скорость потока, определённая по диаграмме СТД, будет завышена, во втором – занижена. Средняя арифметическая величина этих скоростей будет равна скорости потока закачиваемой жидкости в скважину. Схематично этот случай приведён на рис.5.

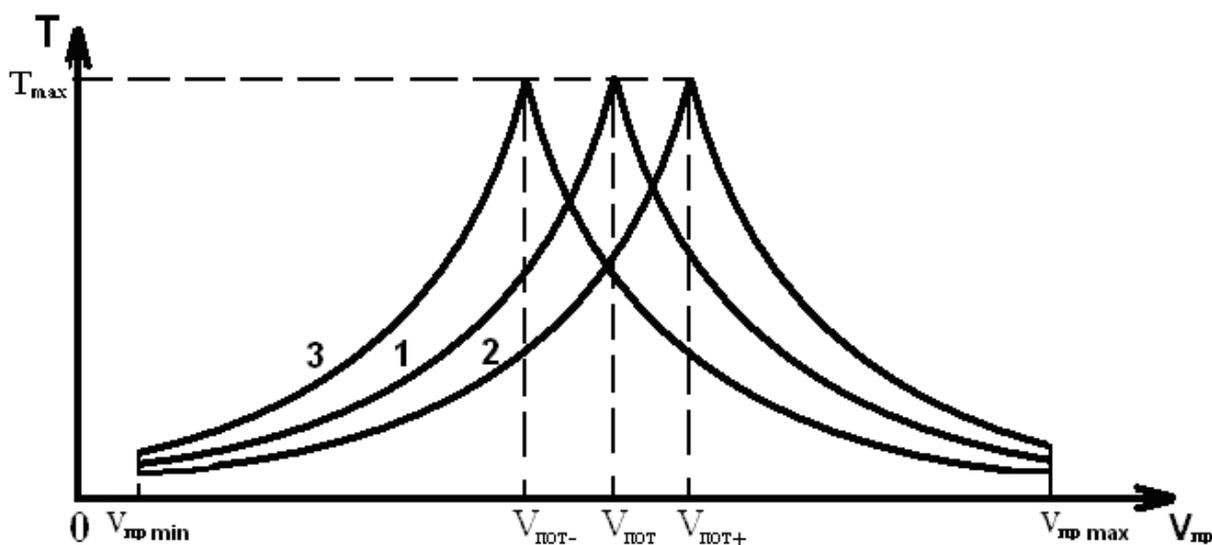


Рис.5. Зависимость показаний термодобитомера от скорости прибора.

Для определения скорости потока жидкости в скважине разработана другая технология, которая заключается в проведении серии измерений каналом СТД с постоянными различными скоростями, а также измерения с переменной скоростью. По результатам измерения с переменной скоростью определяют приблизительно скорость потока жидкости в скважине. После этого проводят по 3-4 измерения термодобитомером как с большей, так и меньшей скоростью протяжки прибора относительно скорости потока жидкости, которую определили при измерении каналом СТД при переменной скорости протяжки прибора. По этим измерениям строят колоколообразную кривую и определяют скорость потока жидкости в скважине.

Также разработана методика определения экстремальной скорости потока жидкости в скважине, т. е. такой скорости потока, которая больше или меньше допустимой скорости протяжки прибора из-за ограничения скорости вращения барабана геофизической лебёдки.

В четвёртой главе приводятся результаты исследований по разработанным технологиям в нагнетательных скважинах ПАО «Башнефть», ПАО «Татнефть» и ОАО «Сургутнефтегаз». Приведены примеры определения характера нарушения герметичности НКТ в нагнетательных скважинах по измерениям термометром. В частности, если нарушение НКТ отмечается на замере термометром при закачке, то в этом случае нарушение НКТ такое, что поток закачиваемой воды через это нарушение может «пробить» обсадную колонну. Если нарушение герметичности НКТ отмечается на замере термометром, которое зарегистрировали сразу после прекращения закачки воды в скважину, то в этом случае нарушение НКТ небольшое. Длительная закачка воды через такое нарушение приведёт через какое-то время к тому, что промоет резьбовое соединение на муфте НКТ. В результате этого произойдет «полёт» НКТ на забой скважины. Таким образом, показано, что необходимо серьёзное внимание к выявлению герметичности НКТ при геофизических исследованиях.

Для выявления места нарушения герметичности обсадной колонны выше воронки НКТ основным методом является термометрия. При этом измерения термометром должны проводиться по методике временной фильтрации температурных аномалий. В этой методике предполагается, что тепло в радиальном направлении распространяется за счёт кондуктивной теплопроводности. Однако конструкция скважинных приборов в настоящее время такая, что при определённом положении прибора тепло в радиальном направлении распространяется за счёт конвективной теплопроводности. В работе разработана методика проведения измерений каналом термометра, которая позволяет определять герметичность обсадной колонны выше воронки НКТ независимо от конструкции прибора. Для этого анализируется поведение термограммы вблизи воронки НКТ. Если выпуклость термограммы в НКТ направлена к геотермическому распределению, то в этом случае нарушена герметичность колонны выше воронки НКТ, иначе колонны герметична.

В работе приведены результаты исследований, проведённые по этой методике в нагнетательных скважинах ОАО «Сургутнефтегаз» и ПАО «Татнефть». Результаты этих исследований показали высокую эффективность. Так из 28 нагнетательных скважин ОАО «Сургутнефтегаз», в которых провели исследования по этой методике, в пяти скважинах определили нарушение герметичности колонны выше воронки НКТ. Результаты исследований после подъёма НКТ в пяти нагнетательных скважинах подтвердили заключения, выданные по данным термометрии, которые были получены ранее при проведении исследований через НКТ.

На рис.6 и рис.7 приведены результаты исследований термометром и термодебитометром при определении герметичности обсадной колонны выше воронки НКТ.

Здесь кр.1 – термограмма, зарегистрированная при квазистационарном режиме закачки, а кр.2 – термограмма, зарегистрированная после прекращения закачки воды в скважину. Характер распределения температуры при закачке вблизи воронки НКТ указывает на то, что имеется движение закачиваемой

воды по межтрубному пространству вверх от воронки НКТ. Это означает, что герметичность обсадной колонны в интервале, перекрытом НКТ, нарушена.

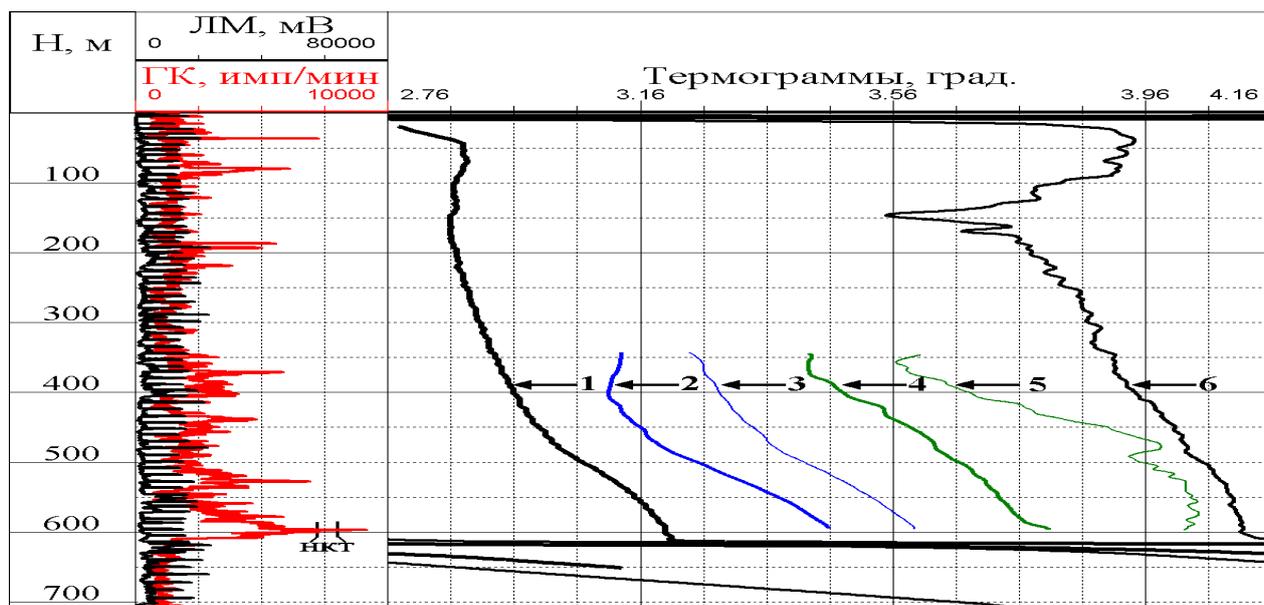


Рис.6. Изучение технического состояния обсадной колонны

Результаты измерений термодобитомером, проведённые с переменной скоростью протяжки прибора, показывают, что скорость потока закачиваемой воды в НКТ составляет 3602 м/час, а в эксплуатационной колонне она равна нулю. Это означает, что вся закачиваемая вода уходит в место нарушения герметичности обсадной колонны, расположенной выше воронки НКТ.

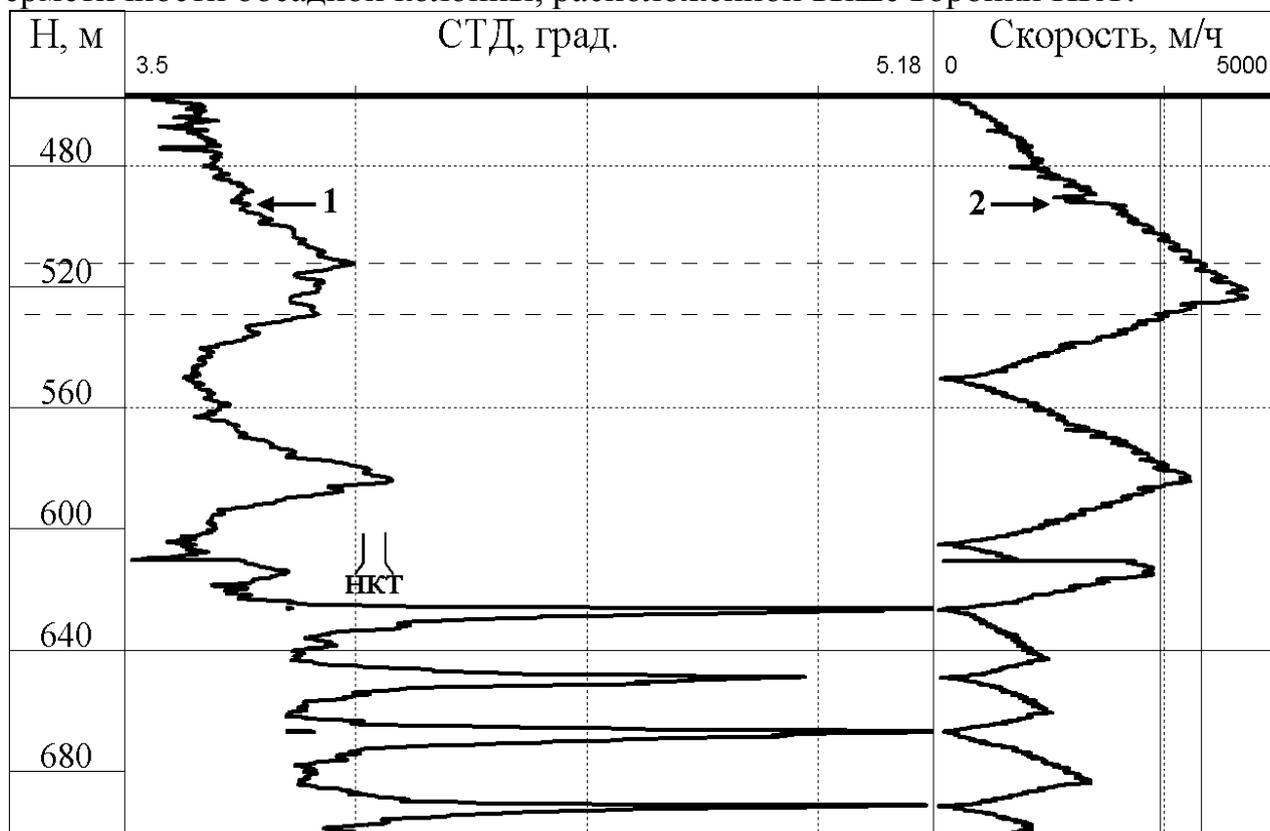


Рис. 7. СТД с переменной скоростью протяжки прибора в скважине 1699 Акташской площади от 10.12.2014

На рис.8 приведён пример определения глубины нарушения герметичности обсадной колонны по измерениям каналом СТД, проведенными с различными скоростями протяжки прибора. Измерения проведены при спуске автономного прибора на скребковой проволоке со скоростями: 660 м/час – кр.10; 710 м/час – кр.9; 860 м/час – кр.8; 900 м/час – кр.7; 1030 м/час – кр.6; 1140 м/час – кр.5; 1290 м/час - выше 1000м, а ниже - 1210 м/час – кр.4; 1310 м/час – кр.3; 1340 м/час – кр.2.

Из рисунка видно, что показания в интервале 984,8-989,5м на кр.3 (синяя кривая) значительно превосходят относительно других кривых, а в интервале 989.5-997.0м показания на кр.4 превосходят относительно других кривых. Следовательно, можно полагать, что в интервале 984,8-989,5м скорость потока закачиваемой воды V_n равна скорости регистрации кр.4, т.е. $V_n=V_{np}=1310$ м/час, а в интервале 989,5-997,0м скорость потока закачиваемой воды равна скорости регистрации кр.3, т.е. $V_n=V_{np}=1290$ м/час.

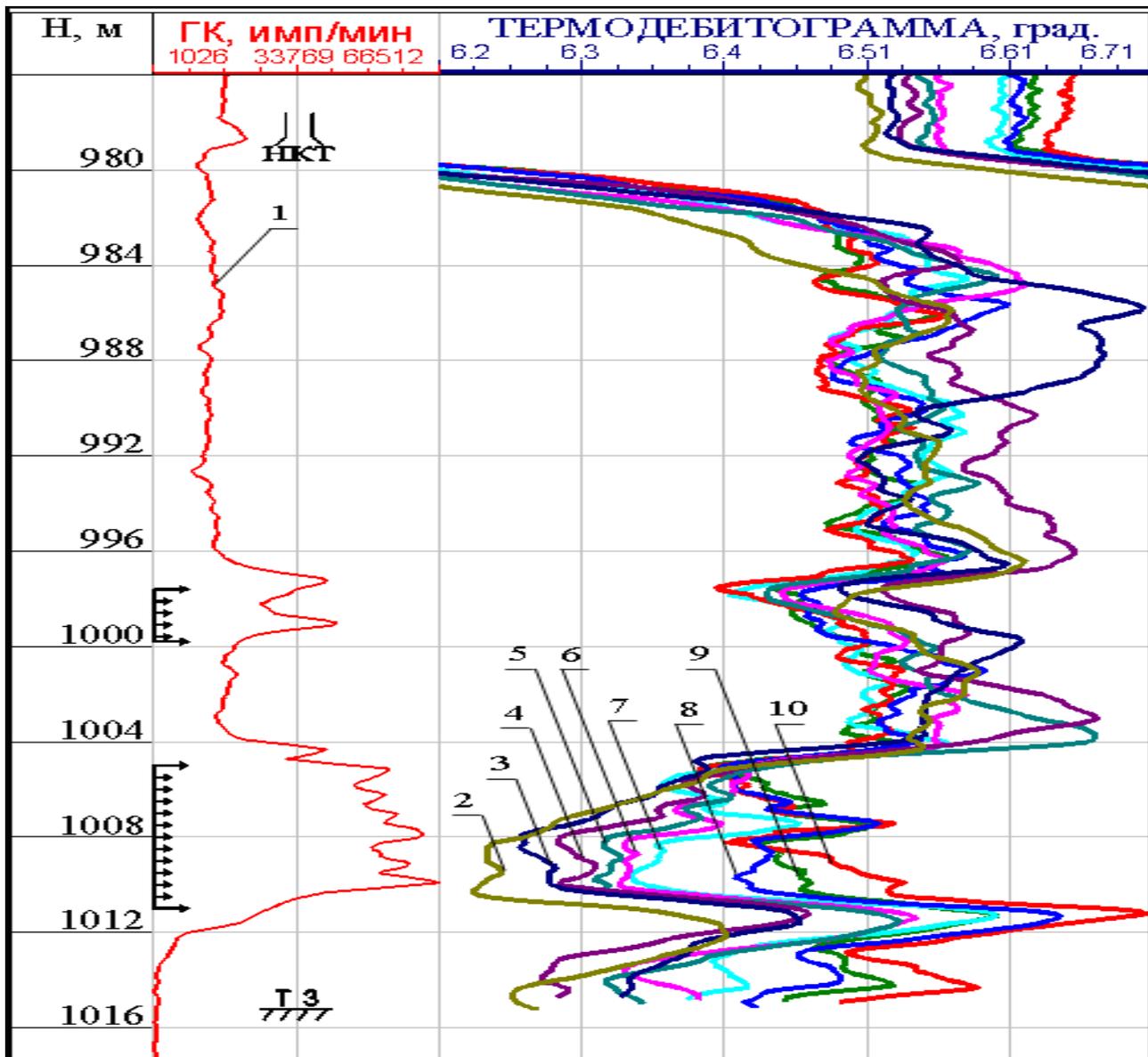


Рис.8. Определение глубины нарушения герметичности обсадной колонны по измерениям термодобитомером в нагнетательной скважине

Таким образом, на глубине 989.5м происходит изменение скорости потока на 20 м/час. Это связано с уходом закачиваемой воды через нарушение герметичности колонны на этой глубине в объёме $Q=7 \text{ м}^3/\text{сут}$. По измерениям термометром при закачке, а также по данным механической расходомерии нарушение герметичности колонны на этой глубине не отмечается.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения работы получены следующие основные результаты:

1. Разработана математическая модель распределения температурного поля в системе скважина-пласт в процессе закачки воды, реализованная в виде программного комплекса. Сравнение результатов решения ряда тестовых задач с известными аналитическими и численными решениями показало адекватность разработанной модели.

2. На основании теоретических работ и измерений в скважинах разработана технология проведения исследований автономной комплексной аппаратурой в нагнетательных скважинах с целью определения герметичности обсадной колонны выше воронки НКТ.

3. Установлены критерии эффективности термометрии при определении нескольких мест нарушения герметичности колонны в скважине.

4. Разработана технология проведения измерений термоанемометром (канал СТД) для определения скорости потока закачиваемой воды в нагнетательную скважину. Приведены примеры определения как герметичности обсадной колонны в свободной от НКТ части скважины, а также количества воды поглощаемой интервалом нарушения колонны, так и герметичности обсадной колонны выше воронки НКТ.

5. Показано, что зависимость показаний СТД от скорости протяжки прибора описывается колоколообразной кривой. Эту зависимость можно получить как непосредственно путём измерения термодобитомером с переменной скоростью протяжки прибора, так и в результате построения кривой по данным серии измерений термодобитограмм с различными постоянными скоростями.

6. Показано, что максимальная чувствительность метода СТД может быть достигнута только в том случае, когда направление движения термодобитомера совпадает с направлением потока закачиваемой воды в скважине.

7. Вычислительный эксперимент показал и косвенно экспериментально подтверждено наличие радиального градиента температуры в потоке закачиваемой воды. Показано, что радиальный градиент температуры вдоль ствола скважины не постоянный. На устье он равен нулю, а ниже принимает отрицательные значения до тех пор, пока температура в потоке не станет меньше геотермической. Причём на некоторой области глубин, которую назвали областью инверсии, разница температуры между стенкой и осью потока, а также между различными образующими в потоке будет равна нулю. Ниже области инверсии градиент температуры положительный. При проведении исследований автономной аппаратурой на кабеле радиальный

градиент температуры можно использовать для выявления места нарушения герметичности НКТ/колонны, в том числе и малые нарушения – типа утечки.

8. Изучено влияние конструкции термометра на результаты измерений температуры в скважине. Результаты измерений термометром комплексной аппаратурой при исключении перемешивания жидкости вблизи датчика температуры показывают очень высокую эффективность метода при определении герметичности обсадной колонны и НКТ в нагнетательных скважинах.

9. Технология исследования термометром при определении герметичности обсадной колонны в интервале, перекрытом НКТ, внедрена в тресте «Сургутнефтегеофизика» и ООО «ТНГ-Групп» ПАО «Татнефть». Технология исследований каналом термоанемометра (СТД) внедрена ООО «ТНГ-Групп» ПАО «Татнефть».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных издания не входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования (ВАК РФ)

1. Мухутдинов В.К. Определение интервала заколонной циркуляции вверх от перфорированных пластов в нагнетательных скважинах / В.Ф.Назаров, В.К.Мухутдинов, Л.Л. Пацков, Ф.Ф.Нуртдинов // Каротажник. – 2007. – №3.– С. 97-105.
2. Мухутдинов В.К. Определение места нарушения герметичности обсадной колонны или насосно-компрессорных труб в нагнетательных скважинах/ В.Ф.Назаров, В.К.Мухутдинов, Л.Л. Пацков, Ф.Ф.Нуртдинов // Каротажник. – 2007. – № 5. – С. 18-25.
3. Мухутдинов В.К. Определение нижней границы движения жидкости в нагнетательной скважине по данным термометрии / В.Ф.Назаров, В.К.Мухутдинов, Д.Б. Зайцев, Ф.Ф.Нуртдинов // Каротажник.– 2009.– №10.– С. 102-119.
4. Мухутдинов В.К. Определение скорости потока закачиваемой воды в нагнетательных скважинах по результатам измерений механическим расходомером / В.Ф.Назаров, В.К.Мухутдинов// Нефтепромысловое дело. – 2012. – С. 34-38.
5. Мухутдинов В.К. Влияние конструкции термометров на качество результатов измерений в скважинах / В.Ф.Назаров, В.К. Мухутдинов, К.Р. Ахметов, Ф.Ф. Азизов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 9.– С. 114-117.

Публикации в прочих журналах и сборниках конференций

6. Пат. № 2535539 РФ, МКИ Е 21 В. Способ определения герметичности обсадной колонны выше воронки насоснокомпрессорных труб по измерениям термометром в нагнетательной скважине / В.Ф. Назаров, Д.Б. Зайцев, В.К. Мухутдинов (Россия); заявка на изобретение. 25.02.2013; опубл. 15.10.2014.

7. Мухутдинов В.К. Определение больших скоростей потока жидкости в нагнетательных скважинах по измерениям термодобитометром / Д.К. Афанасьев, В.К. Мухутдинов, В.Ф. Назаров // VI Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и её приложения в естествознании». – Уфа. – 2013. – 228 с.
8. Мухутдинов В.К. Зависимость глубины точки инверсии от скорости потока воды в нагнетательной скважине / А.Р. Бухаров, Д.Б. Зайцев, В.К. Мухутдинов, В.Ф. Назаров // VI Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и её приложения в естествознании». – Уфа. – 2013. – 228 с.
9. Мухутдинов В.К. Использование данных термодобитометрии для определения герметичности обсадной колонны в нагнетательных скважинах / В.К. Мухутдинов, В.Ф. Назаров // Повышение эффективности геологоразведочных работ: Сб. докладов Восьмой молодёжной научно-практической конференции. – Уфа. – № 7. – 2013. – С. 74-77.
10. Мухутдинов В.К. Признаки определения нарушения герметичности обсадной колонны в нагнетательной скважине выше башмака насосно-компрессорных труб / В.Ф. Назаров, В.К. Мухутдинов, Ф.Ф. Нуртдинов // Тезисы докладов Секции D VII Конгресса нефтегазопромышленников России. – Уфа. – 2007. – С. 122-124.
11. Мухутдинов В.К. Анализ эффективности использования дистанционной и автономной комплексной аппаратуры при исследовании нагнетательных скважин / В.Ф. Назаров, В.К. Мухутдинов, Ф.Ф. Нуртдинов // XIX Научно-практическая конференция «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин». Тезисы докладов конференции в рамках XVI Международной специализированной выставки «Газ. Нефть. Технологии 2008». – Уфа. – 2008. – С. 197-199.
12. Мухутдинов В.К. Определение места нарушения герметичности насосно-компрессорных труб в нагнетательных скважинах / В.Ф. Назаров, В.К. Мухутдинов // Геофизика-фундамент геологоразведки. Инновационные технологии в промысловой геологии и геофизике. 80-летию посвящается. Сборник докладов шестой и седьмой молодёжной научно-практической конференции. – Уфа. – 2012. – С. 164-167.
13. Мухутдинов В.К. К методике определения скорости потока закачиваемой в нагнетательные скважины воды по измерениям термодобитометром / В.Ф. Назаров, В.К. Мухутдинов, Р.С. Мухамадиев // XIX Научно-практическая конференция «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин». Тезисы докладов конференции в рамках XXI Международной специализированной выставки «Газ. Нефть. Технологии 2013». – Уфа. – 2013. – С. 265-271.
14. Мухутдинов В.К. Применение термометрии и термодобитометрии при контроле технического состояния нагнетательных скважин / В.Ф. Назаров, В.К. Мухутдинов // Юбилейная XX Научно-практическая конференция «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин».

- Тезисы докладов конференции, посвященной 50-летию кафедры «Геофизика» Башкирского государственного университета в рамках XXII Международной специализированной выставки «Газ. Нефть. Технологии 2014».–Уфа. –2014.–С.28-31.
15. Мухутдинов В.К. Определение поинтервальной приёмистости жидкости в нагнетательных скважинах по измерениям термодобитометром / Р.С.Мухамадиев, В.Ф.Назаров, В.К. Мухутдинов // Закономерности и тенденции развития науки в современном обществе. Сборник статей Международной научно-практической конференции. –Уфа. –2015. –С.61-65.
 16. Мухутдинов В.К. Контроль герметичности обсадной колонны и НКТ в нагнетательных скважинах по измерениям комплексной аппаратурой./ В.Ф.Назаров, В.К. Мухутдинов // Инновационная наука. –2015. –С.107-113.
 17. Мухутдинов В.К. Изучение радиального градиента температуры в потоке закачиваемой воды в нагнетательной скважине / В.Ф. Назаров, В.К.Мухутдинов // «Актуальные проблемы в современной науке и пути их решения»: Сборник статей XXI Международной научно-практической конференции. –Москва. –2016. –С.82-86.
 18. Мухутдинов В.К. Изучение распределения температуры в потоке закачиваемой воды в нагнетательной скважине при нарушенной герметичности обсадной колонны выше башмака НКТ / В.Ф. Назаров, В.К. Мухутдинов // «Примеры фундаментальных и прикладных исследований». Сборник XXIII Международной научно-практической конференции. –Новосибирск. –2016. –№1. –С.59-65.

Подписано в печать 11.02.17 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать ризографическая. Тираж 120 экз. Заказ 037.
Гарнитура «TimesNewRoman». Отпечатано в типографии
«ПЕЧАТНЫЙ ДОМЪ» ИП ВЕРКО.
Объем 1 п.л. Уфа, Карла Маркса, 12, корп. 5.