

МНОГОФАЗНЫЙ ПОТОК В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

Сафиуллин Дамир Рустамович

магистрант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ, РФ, г. Казань

Сойко Алексей Игоревич

научный руководитель, канд. техн. наук, доцент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ, РФ, г. Казань

Аннотация. В настоящий момент технология разработки пластов горизонтальными скважинами (ГС) смогла доказать свою эффективность, в том числе при разбуривании пластов с некоторыми особенностями строения пород-коллекторов, включая такие свойства, как наличие ловушек, трещиноватость, объём порового пространства. В то же время вне зависимости от траектории ствола скважины ключевыми задачами при разработке залежей нефти и газа остаются определение параметров пласта и скважин, а также прогнозирование характера добычи. Однако появление современных технологий горизонтального бурения и новых технических решений, включая такие, как щелевой фильтр-хвостовик, приводят к различным изменениям в процесс добычи, а также к ухудшению прогнозируемости процессов, происходящих во внутрискважинной области и околоскважинном пространстве.

Ключевые слова: геофизические исследования, горизонтальные скважины, фильтр-хвостовик, термометрия, расходометрия, моделирование.

Термин геофизические исследования включает довольно обширный спектр различных испытаний скважин, направленных на нахождение параметров флюида и пласта. Один из таких методов исследований – термометрия – позволяет получить данные о естественных тепловых полях земных недр, которые, в свою очередь, позволяют решать такие задачи как построение литологического разреза, прогнозирование тектонического строения исследуемых районов, вычленение пород-коллекторов, получение сведений о мерзлотной и гидрогеологической характеристиках территории, нахождение естественной температуры горных пород на заданной глубине. Исследование искусственных тепловых полей направлено на решение таких задач, как выделение работающих интервалов, нахождение местоположения затрубной циркуляции и притоков пластовой воды, определение мест негерметичности обсадной колонны и НКТ, оценка расхода жидкости в скважине, осуществление

Несмотря на непрерывное совершенствование технологий проведения и интерпретации ГИС существует ряд проблем и осложнений, связанных с прогнозированием свойств пласта по результатам исследований горизонтальных скважин. В целом, проблемы можно поделить на две группы:

- проблемы и осложнения, возникающие на этапе проведения испытаний;
- проблемы и осложнения, возникающие во время интерпретации результатов ГИС.

Обе группы проблем и осложнений связаны напрямую, и возникновение трудностей на этапе интерпретации зачастую объясняется нерешенными проблемами на этапе проведения исследований.

Для объектов, эксплуатируемых вертикальными скважинами, технология проведения ГИС уже имеет существенный опыт реализации в различных условиях с внедрением на любой стадии разработки. Однако исследования в горизонтальных и наклонных скважинах пока что не получили достаточного технического и методического обеспечения. Осложнения, возникающие в процессе проведения исследований горизонтальных скважин обусловлены: относительной новизной самого способа вскрытия залежи, геологическими особенностями продуктивных пластов, различными способами заканчивания скважин, гравитационной сегрегацией многофазных потоков при изменении траектории ствола скважины, необходимостью применения в таких условиях специального скважинного оборудования и выбора средств доставки прибора в ствол скважины [6, с. 23]. Все это требует особого подхода к методике испытаний горизонтальных скважин, а такой подход, в первую очередь, требует от интерпретатора глубоких знаний процессов, происходящих в стволе, в особенности, при течении многофазного потока.

Для улучшения представления о внутрискважинных процессах некоторые отечественные и зарубежные исследователи производили как математическое, так и физическое моделирование многофазного потока в горизонтальной скважине. В частности, Р. А. Валиуллин и Р. К. Яруллин изучали поведение многофазного потока с использованием уникального гидродинамического стенда. В результате испытаний установлено, что в горизонтальной части ствола происходит гравитационное расслоение многофазного потока, а основным фактором в формировании сегрегированного потока является траектория ствола скважины. Даже небольшое изменение угла наклона относительно горизонтали ($\pm 0,5^\circ$) приводит к существенному изменению фазосодержания и локальных скоростей по сечению ствола при постоянных значениях расхода [1, с. 23].

Для решения проблемы проведения расходомерии сегрегированного потока, предложена новая конструкция расходомера, оснащенного не одной центрированной вертушкой, которой оснащаются стандартные расходомеры (рисунок 1а), а пятью мини-вертушками, расположенными вдоль вертикального диаметра ствола (рисунок 1б) [7, с. 3].

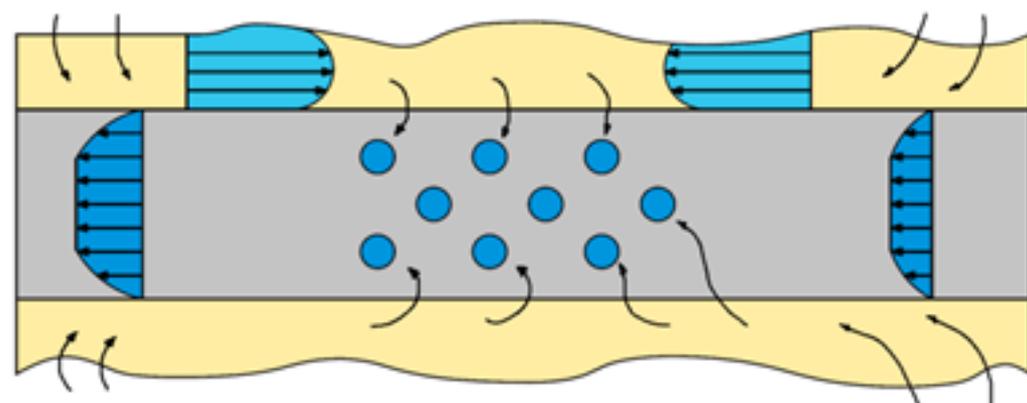


а) Стандартный расходомер б) Расходомер нового типа

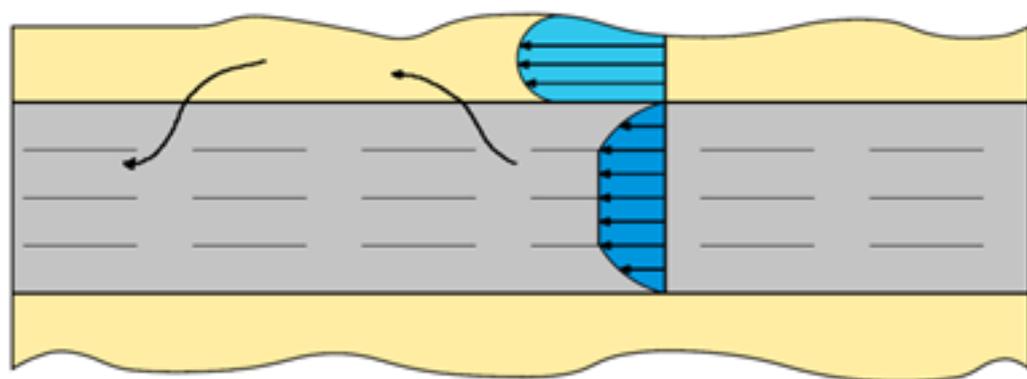
Рисунок 1. Особенности проведения расходомерии разными типами расходомеров

Помимо проблемы сегрегации потока в скважине, исследователями T Ben Naoua и S. Abubakar рассмотрено влияние способа заканчивания скважины на характер потока и показания геофизических приборов (рисунок 2). Исследователи установили, что, когда щелевой

хвостовик не оснащен трубной подвеской, возможны два пути движения потока: один внутри щелевого хвостовика, а другой снаружи, с возможностью перетока флюида между этими двумя областями. Однако стандартные расходомеры могут измерять поток только внутри щелевого хвостовика. Отсутствие информации о внешнем потоке повышает неопределенность относительно реальной продуктивной зоны (зон) и может повлиять на успех будущих операций в скважине. Кроме того, если два потока независимы (рисунок 2а), то измерение потока во внутренней области не даст никакой информации о потоке во внешней области. В связи с высокой степенью сложности оценивания независимых потоков, исследователями решено рассматривать вариант заканчивания с щелевым фильтром-хвостовиком, когда потоки являются относительно независимыми (рисунок 2б).



а) независимый поток



б) относительно независимый поток

Рисунок 2. Возможные варианты потока в фильтре-хвостовике

С целью получения общего профиля притока из пласта в скважину исследователи провели испытания с комбинированным применением расходо-метрии, импульсного нейтронного каротажа и распределенной оптоволоконной термометрии. Технология распределенной термометрии позволяет получать «мгновенную» картину температурного поля в ГС, не внося искажения за счет движения прибора и средства доставки. Импульсный нейтронный каротаж направлен на определение объемного фазосодержания в многофазном потоке как в хвостовике, так и в кольцевом пространстве, однако он не чувствителен к скорости жидкости, в то время как термометрия позволяет идентифицировать зоны притока жидкости вне хвостовика, но только качественно. На возможность использования технологии распределенной термометрии в горизонтальных скважинах также указывали отечественные исследователи Р. А. Валиуллин и Р. К. Яруллин [1, с. 27]. Сочетание результатов интерпретации распределенной оптоволоконной термометрии и расходо-метрии позволяет

исследователям с высокой точностью идентифицировать участки притока флюида из пласта и отслеживать движение потока внутри и вне целевого хвостовика.

Помимо прибора, представленного на рисунке 1, существуют и ряд других устройств, разработанных для проведения испытаний горизонтальных скважин. К примеру, российская компания НПФ «Геофизика» занимается производством прибора АГАТ-КГ-42, в котором особенности сегрегированного потока учитываются шестью датчиками влагомера, расположенными по периметру окружности стенки скважины. Также в большей степени решен вопрос доставки скважинной аппаратуры на забой ГС за счет применения таких технологических схем, как «гибкая труба», забойный трактор и жесткий кабель [4, с. 387].

Основные трудности, возникающие при интерпретации результатов ГИС, связаны с тем, что подходы к обработке данных разработаны для вертикальных скважин с коаксиально-цилиндрической моделью изотропных сред, а почти все методы ГИС в ГС регистрируют кажущиеся кривые геофизических параметров, на которые оказывают влияние выше- и нижележащие пропластки. В работах разных авторов обозначены следующие основные проблемы, при обработке результатов геофизических исследований горизонтальных скважин: влияние объема испытаний на регистрацию кривых ГИС; возможность одинаковых показаний кривых ГИС при равновероятных сценариях положения пластов по отношению к стволу скважины; влияние эффекта макроанизотропии [2, с. 8].

Определение работающих интервалов даже по результатам исследований вертикальных скважин может вызывать затруднения. И как указано ранее, универсального решения для всех объектов исследования не существует. Тем не менее, уже разработаны достаточно эффективные методики обработки результатов испытаний горизонтальных скважин. В частности, при обработке профилей расходомерии и распределенной термометрии была обнаружена закономерность, что на нисходящих участках ствола ГС тяжелая фаза ускоряется под действием силы тяжести и имеет тенденцию течь быстрее, чем более легкая фаза (рисунок 3). При сохранении массы уменьшается площадь поперечного сечения, занимаемая тяжелой фазой, и фазосодержание также снижается. Для легкой фазы верно обратное, она замедляется и занимает большую площадь. Точно так же на восходящих участках легкая фаза ускоряется и занимает меньшую площадь поперечного сечения, а тяжелая фаза замедляется и занимает большую площадь сечения. Кроме того, из рисунка 3 видно, что в расслоенном потоке образуются застойные зоны в местах перегиба ствола и могут возникать обратные потоки в скважине [5, с. 65].

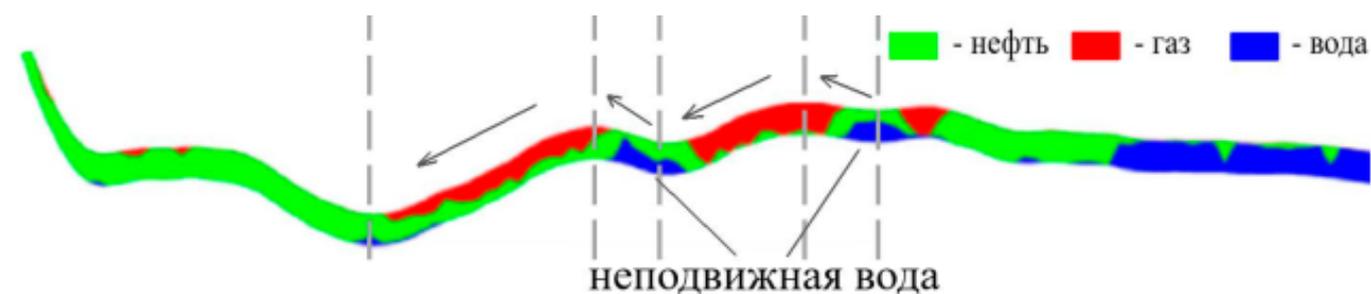


Рисунок 3. Распределение фаз в потоке горизонтальной скважины

В качестве одного из перспективных инструментов изучения многофазного потока в горизонтальных и наклонных скважинах могут выступать программы математического моделирования, включая такие как программное обеспечение для моделирования гидродинамических процессов VMGSim. Перейдем к постановке задачи исследования течения многофазного флюида.

На рисунке 4 изображены две схемы для сравнительного анализа течения потока с вертикальным расположением приустьевое участка, и наклонным участком под углом в 70°

от вертикальной оси. Ввиду того, что в программном обеспечении отсутствует функционал по установке наклона трубы от вертикали, было принято решение разбить всю длину НКТ, равную приблизительно 15000 м, на несколько участков с заданными перепадами высот и длинами.

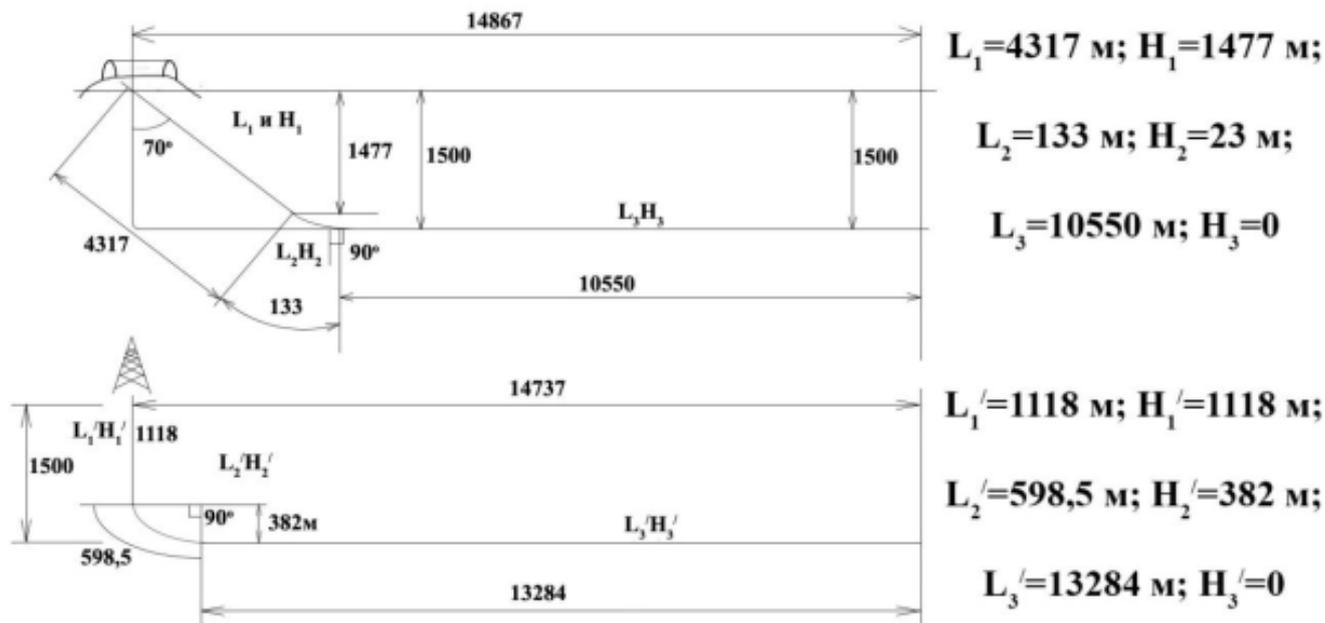


Рисунок 4. Схемы прокладки колонн НКТ

Для моделирования многофазного потока были взяты нефть (свойства брались из библиотеки ПО), вода и газ. На рисунке 5 представлена итоговая схема течения потока ГЖС в скважине с вертикальным приустьевым участком.

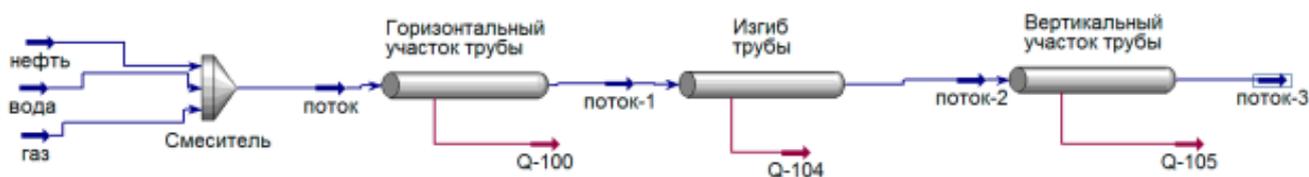


Рисунок 5. Схема скважины с вертикальным приустьевым участком

Далее выбрана методика расчета течения потока в скважине, позволяющая вычислить свойства трехфазного потока. Заданы внешний диаметр и толщина стенки насосно-компрессорных труб, равные 114,3 мм и 7 мм соответственно, а в качестве материала НКТ выбрана малоуглеродистая сталь.

В результате моделирования получены сведения по всем участкам колонны НКТ. Для повышения точности измерений протяженные участки скважины было принято решение разделить на участки меньшей длины (около 2000 м каждый). На рисунке 6 и рисунке 7 представлены сравнительные гистограммы изменения фаз на забое и устье скважины в

процентах с наклонным приустьевым участком и вертикальным расположением приустьевого участка соответственно.

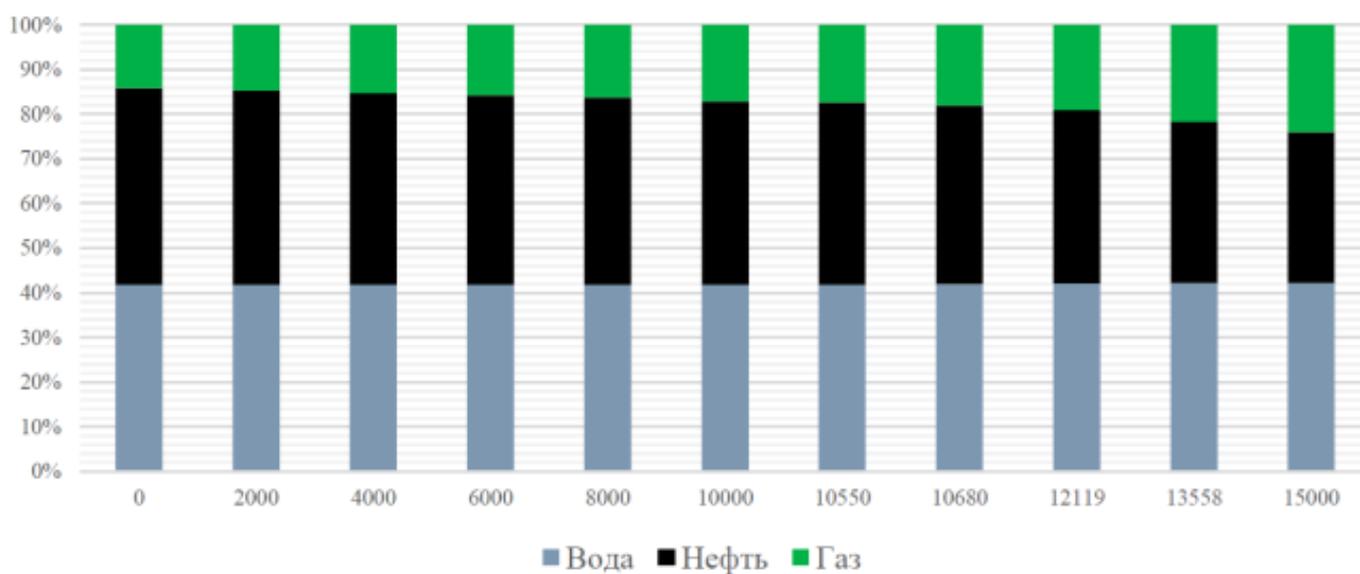


Рисунок 6. Изменение соотношения фаз по длине НКТ с наклонным приустьевым участком

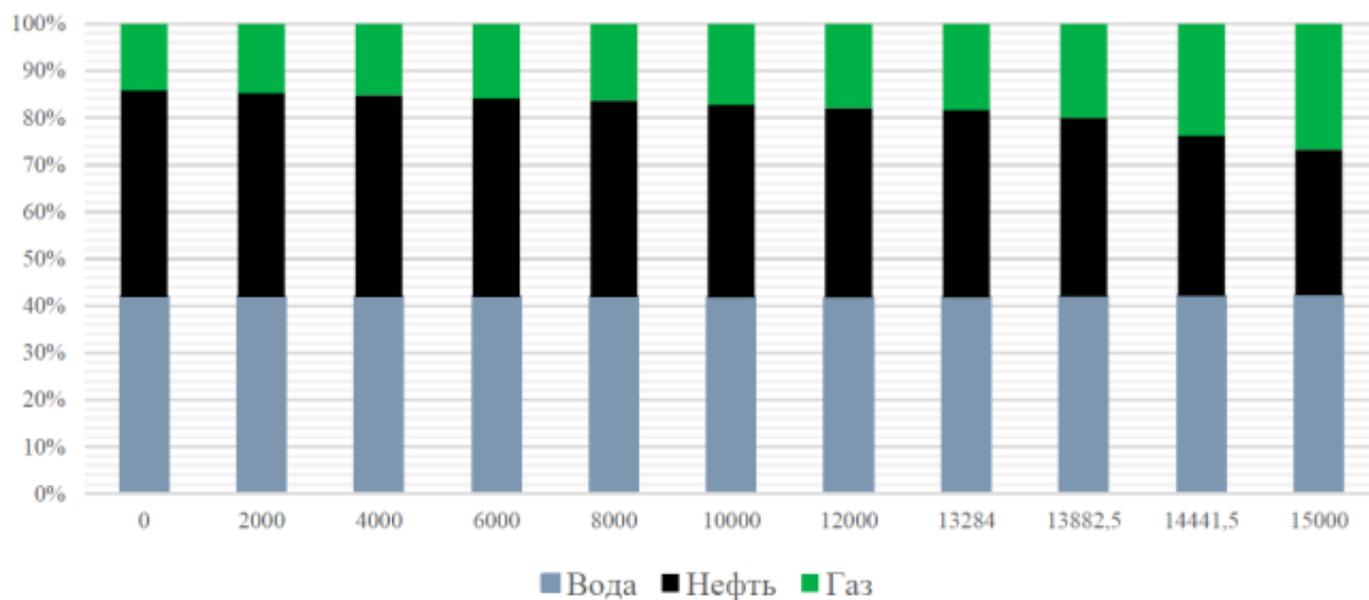


Рисунок 7. Изменение соотношения фаз по длине НКТ с вертикальным приустьевым участком

Выводы и рекомендации

Несмотря на многолетний опыт бурения и эксплуатации горизонтальных скважин исследования ГС и их интерпретация по-прежнему вызывают ряд затруднений.

Технология проведения и техническое оснащение испытаний скважин продвинулись на значительный уровень, уже сегодня существуют как за-рубежные, так и отечественные

аппараты, разработанные специально для исследований ГС. Данные устройства позволяют учесть геологические особенности залежей, различные способы заканчивания скважин и гравитационное расслоение многофазных потоков в ГС при различных траекториях ствола.

Однако всё ещё слабо проработаны методики интерпретации результатов ГИС. Это во многом объясняется большим разнообразием фильтрационных процессов в скважине, зависящих как от параметров самой скважины, так и от свойств пласта.

Совершенствование подходов к обработке профилей ГИС, в первую очередь, требует от интерпретатора глубоких знаний физических процессов, происходящих в стволе, в особенности, при многофазных потоках. Улучшить понимание внутрискважинных процессов возможно при изучении как математических, так и физических моделей потока в ГС.

В результате создания и изучения модели трехфазного потока в горизонтальной скважине можно сделать следующие выводы:

- выполнено моделирование течения многофазного флюида в НКТ для двух типов траекторий скважин одинаковой длины. При этом траектория с наклонным приустьевым участком позволяет осуществлять добычу более удалённых объектов (длина 14735 м против 14866 м);
- для трехфазного течения характерно выделение газовой фазы при уменьшении давления и температуры потока, при этом потери давления увеличиваются для одинаковых по длине участков по мере удаления от забоя скважины;
- при наклонном расположении приустьевого участка давление флюида на устье составило 91,8 бар, против давления 83,85 бар для вертикального. Разница 7,95 бар позволит увеличить время эксплуатации скважины за счёт энергии пласта;
- данное моделирование показало, что наклонное расположение приустьевого участка скважины имеет ряд преимуществ не только при бурении скважин с большими отходами от вертикали, но и при добыче, по сравнению с траекторией скважины с вертикальным расположением приустьевого участка;

Список литературы:

1. Валиуллин, Р. А. Особенности геофизических исследований действующих горизонтальных скважин / Р. А. Валиуллин, Р. К. Яруллин // Вестник АН РБ. – 2014. – № 1. – С. 21-28.
2. Новые подходы и технологии интерпретации данных геофизических исследований горизонтальных скважин / Н. В. Щетинина, А. В. Мальшаков, М. А. Басыров и др. // Научно-технический вестник ОАО «НК «РОСНЕФТЬ». – 2016. – № 43. – С. 6-14.
3. Парфенов, Н. А. Особенности интерпретации типового комплекса ГИС в горизонтальных и наклонных скважинах / Н. А. Парфенов, С. В. Барашков // Проблемы геологии и освоения недр. – 2012. – С. 404-405.
4. Семенов, К. В. Модернизация приборов АГАТ-КГ42-6В и АГАТ-КГ42-СТВ6 для исследования эксплуатационных горизонтальных скважин / К. В. Семенов // Нефтегазовое дело – 2013. – № 3. – С. 386-396.
5. Хабиров, Т. Р. Особенности двухфазного расслоенного потока в горизонтальной скважине / Т. Р. Хабиров, Р. Ф. Шарафутдинов // Каротажник. – 2015. – № 243. – С. 404-405.
6. Яруллин, Р. К. Геофизическое сопровождение эксплуатации действующих горизонтальных скважин на Верхнечонском месторождении: текущее состояние и перспективы развития / Р. К. Яруллин, Р. А. Валиуллин, Б. А. Дармаев // Научно-технический вестник ОАО «НК «РОСНЕФТЬ». – 2016. – № 43. – С. 20-27.
7. Combining Horizontal Production Logging and Distributed Temperature Interpretations to Diagnose Annular Flow in Slotted-Liner Completions [Text] / T. B. Haoua [and others] // SPE Middle

East Oil & Gas Show and Conference: (8-11 March 2015). - Manama, 2015. - 13 p.