

**Эволюция развития системы контроля
работы нагнетательных скважин в
ПАО «СУРГУТНЕФТЕГАЗ»**

М.А. Гашин¹,
К.В. Белов¹
А.В. Дорофеев¹
А.И. Иванова¹

¹СургутНИПИнефть, ПАО «Сургутнефтегаз»

Адрес для связи: Gashin_MA@surgutneftegas.ru,
Dorofeev_AV@surgutneftegas.ru

Ключевые слова: авто-гидроразрыв пласта, забойное давление

Применение системы поддержания пластового давления с целью вовлечения запасов низкопроницаемых коллекторов в разработку и достижения проектного коэффициента извлечения нефти неизбежно создание высокого давления нагнетания, что в некоторых случаях, вызывает возникновение эффекта авто-гидроразрыва пласта («авто-ГРП»). Эксплуатация низкопроницаемых коллекторов предъявляет требования к необходимости своевременного диагностирования образования трещин «авто-ГРП» и оптимального регулирования режимов работы нагнетательных скважин с целью управления параметрами создаваемых трещин или недопущения их образования в зависимости от прогнозируемого эффекта. Наиболее перспективным инструментом оперативного определения текущего состояния призабойной зоны скважины является графика Холла, для построения которого необходимо решить задачу корректной непрерывной оценки забойного давления.

**Prospects for the development of a system
for monitoring the operation of injection
wells in PSC «SURGUTNEFTEGAS»**

M.A. Gashin¹
K.V. Belov¹
A.V. Dorofeev¹
A.I. Ivanova¹

¹SurgutSRPIneft, PSC «SURGUTNEFTEGAS»

E-mail: Gashin_MA@surgutneftegas.ru,
Dorofeev_AV@surgutneftegas.ru

Keywords: auto-hydraulic fracturing, bottomhole pressure

The use of a reservoir pressure maintenance system in order to involve low-permeability reservoir reserves in development and achieve the design oil recovery factor inevitably creates high injection pressure, which in some cases causes the effect of auto-hydraulic fracturing ("auto-fracturing"). The operation of low-permeability reservoirs places demands on the need for timely diagnosis of the formation of "auto-fracturing" cracks and the optimal creation of cracks or the prevention of their formation, depending on the predicted effect. The most promising tool for quickly determining the current state of the bottomhole zone of a well is the Hall graph, for its construction, it is necessary to solve the problem of correct continuous assessment of bottomhole pressure.

Введение

В настоящее время большая доля месторождений компании содержит промышленные запасы нефти, относящиеся к категории трудноизвлекаемых. Среди базовых критериев принадлежности запасов к этой категории выделяют низкую проницаемость и продуктивность коллектора.

При применении системы поддержания пластового давления (далее - ППД) с целью вовлечения запасов низкопроницаемых коллекторов в разработку и достижения проектного коэффициента извлечения нефти (далее - КИН) неизбежно создание высокого давления нагнетания, что в некоторых случаях, вызывает возникновение эффекта авто-гидроразрыва пласта, который заключается в самопроизвольном росте трещины в длину. Основным отличием трещин «авто-ГРП» от трещин спроектированного гидроразрыва пласта (далее - ГРП) является то, что этот процесс происходит неконтролируемо, трещины не заполняются проппантом, следовательно, существует возможность их смыкания при снижении давления нагнетания ниже давления разрыва и раскрытия - при его увеличении [1].

Эффективность работы нагнетательных скважин с «авто-ГРП» может быть низкой, так как при закачке возникает множество осложняющих факторов: кинжальные прорывы воды по высокопроницаемым пропласткам к забоям добывающих скважин, утечка нагнетаемой воды в нецелевые интервалы и т.д. Образование (раскрытие) трещин «авто-ГРП» в условиях разработки низкопроницаемых пластов может оказать и положительное влияние - это увеличение КИН при условии, что трещина будет развита до контура питания добывающей скважины. Однако при превышении критической длины развития трещин происходит распространение трещины в зону дренирования добывающей скважины, что приводит к преждевременному обводнению.

Все это говорит о необходимости своевременного диагностирования образования трещин «авто-ГРП» и оптимального регулирования режимов работы нагнетательных скважин с целью управления параметрами [2] (таблица 1) создаваемых трещин или недопущения их образования в зависимости от прогнозируемого (положительного/отрицательного) эффекта.

Таблица 1. Информативные возможности исследований скважин при оценке параметров трещины «авто-ГРП»

Группа методов	Метод исследования	Определяемый параметр трещины «авто-ГРП»
Геофизические	Термометрия	Высота трещины
Промысловые	График Холла	Диагностирование образования трещины
Гидродинамические	Кривая падения давления	Полудлина трещины
	Индикаторная диаграмма	Давление образования/раскрытия/смыкания трещины
Межскважинные исследования	Трассерные исследования	Ориентация трещины
	Гидропрослушивание	

Построение графика Холла является инструментом оперативного определения текущего состояния призабойной зоны скважины (далее – ПЗП). График Холла строится на основе информации о накопленной репрессии в декартовых координатах как функция общего нагнетаемого объема воды. На начальном этапе заводнения график Холла может иметь вид вогнутой восходящей линии. Это вызвано увеличением радиуса контура нагнетания и давлением на контуре нагнетания. Со временем этот эффект становится меньше поскольку увеличивается радиус контура нагнетания скважины. При отсутствии воздействия на ПЗП нагнетательной скважины зависимость двух параметров линейна. Воздействие на скважину диагностируется на графике изменением линейности, например: наклон графика увеличится при выравнивании профиля приемистости за счет снижения приемистости и увеличения репрессии, при кислотных обработках происходит обратный эффект, при котором угол наклона уменьшается. Стоит отметить, что при образовании трещины «авто-ГРП» наклон уменьшается, как и в случае с успешным проведением соляно-кислотной обработки.

В качестве объекта исследования рассмотрим нагнетательную скважину, вскрывающую юрские отложения одного из месторождений Западной Сибири. При анализе геолого-промысловых данных изменения в призабойной зоне пласта трудно диагностируемы, однако, построение графика Холла позволяет выявлять отклонения в росте накопленной закачки и накопленной репрессии (рисунок 1).

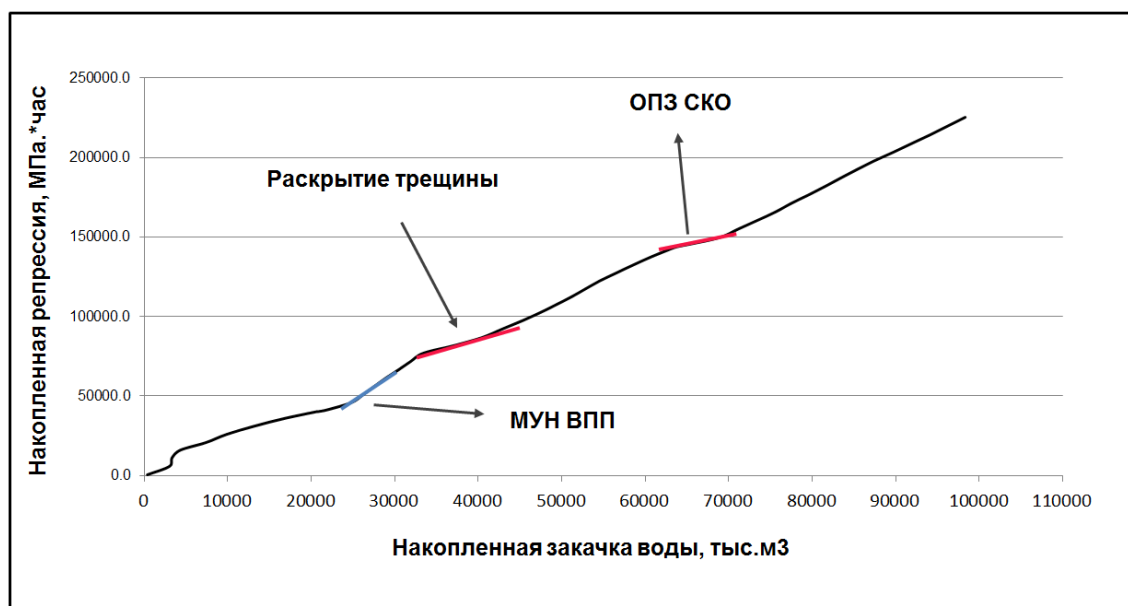


Рис. 1. График Холла по нагнетательной скважине

Если в периоды времени, соответствующие накопленной закачке 25 тыс.м³ и 60 тыс.м³, на скважине проводились геолого-технические мероприятия (далее – ГТМ), то в период времени, соответствующий 35 тыс.м³, ГТМ на скважине не производились. При этом наблюдается снижение угла наклона, что свидетельствует об улучшении свойств ПЗП - раскрытии трещины «авто-ГРП». На скважине были проведены гидродинамические исследования методом кривой падения давления (далее – КПД). По результатам интерпретации на диагностическом графике выделяются линейный и билинейный режимы фильтрации, которые характерны для модели скважин с трещиной, что подтверждает образование или раскрытие трещины «авто-ГРП».

Исходя из полученных данных интерпретации диагностического графика для определения ориентации развития трещины «авто-ГРП» следующим этапом проведено исследование методом гидропрослушивания, в результате которого получена информация о пьезопроводности в направлении реагирующей скважины №2.

Так же, проведён дополнительный анализ текущего давления закачки и гидроразрыва пласта на 7 нагнетательных скважинах. Во всех случаях в период закачки забойное давление в работающей скважине превышает давление ГРП, что подтверждает создание условий для образования в нагнетательных скважинах трещин «авто-ГРП».

Знание величины давления разрыва пород особенно актуально для нагнетательных скважин с целью регулирования режима их работы. Оптимальный режим работы нагнетательной скважины предусматривает «управление» длиной и высотой трещины «авто-ГРП», с целью недопущения таких негативных явлений, как непроизводительная закачка и опережающее обводнение соседних добывающих скважин.

Управление динамической частью трещины осуществляется с помощью оборудования регулирующего давление нагнетания, при котором происходит изменение забойного давления в работающей скважине. Этим процессом можно управлять с помощью частотного преобразователя на водозаборной скважине, при внутрикустовой закачке.

Управление динамической частью трещины осуществляется с помощью оборудования регулирующего давление нагнетания, при котором происходит изменение забойного давления в работающей скважине. Этим процессом можно управлять с помощью частотного преобразователя на водозаборной скважине, при внутрикустовой закачке.

По результатам проведенных исследований и анализа промысловых данных разработан алгоритм мониторинга образования трещин «авто-ГРП». Алгоритм основан на диагностировании трещины «авто-ГРП» при периодическом построении графика Холла. Первоначальным этапом, раз в неделю, строится график Холла и при его отклонении от линейной зависимости, определяется угол наклона. Следующим этапом проводится комплекс мероприятий:

- в случае уменьшения угла наклона графика Холла (при этом на скважине не производились ГТМ) планируется проведение гидродинамических исследований скважин (далее – ГДИС) для уточнения параметров развития трещин (полудлины) с последующим контролем и выбором оптимального режима работы нагнетательной скважины;

- в случае увеличения угла наклона (при отсутствии на скважине проведенных мероприятий по выравниванию профиля приемистости) планируется ГТМ с целью нормализации ПЗП, с последующим проведением ГДИС и выбором оптимального режима работы нагнетательной скважины.

Для реализации разработанного алгоритма нам необходимо решить задачу корректной непрерывной оценки забойного давления.

На практике определение забойного давления нагнетательных скважин осуществляется при помощи замера устьевым или глубинным манометром, непрерывный дистанционный (вывод параметров в реальном времени) контроль устьевых и забойных давлений отсутствует.

Корректный расчет устьевого и забойного давления возможен только при правильном учете изменения давления на различных участках линий нагнетательного водовода до пласта, поэтому специалистами «СургутНИПИнефть» проведен анализ с последующим выводом расчетных формул.

Рассмотрим 3 участка на основных элементах нагнетательного трубопровода, регулирующей арматуры и скважинной компоновки (рисунок 3).

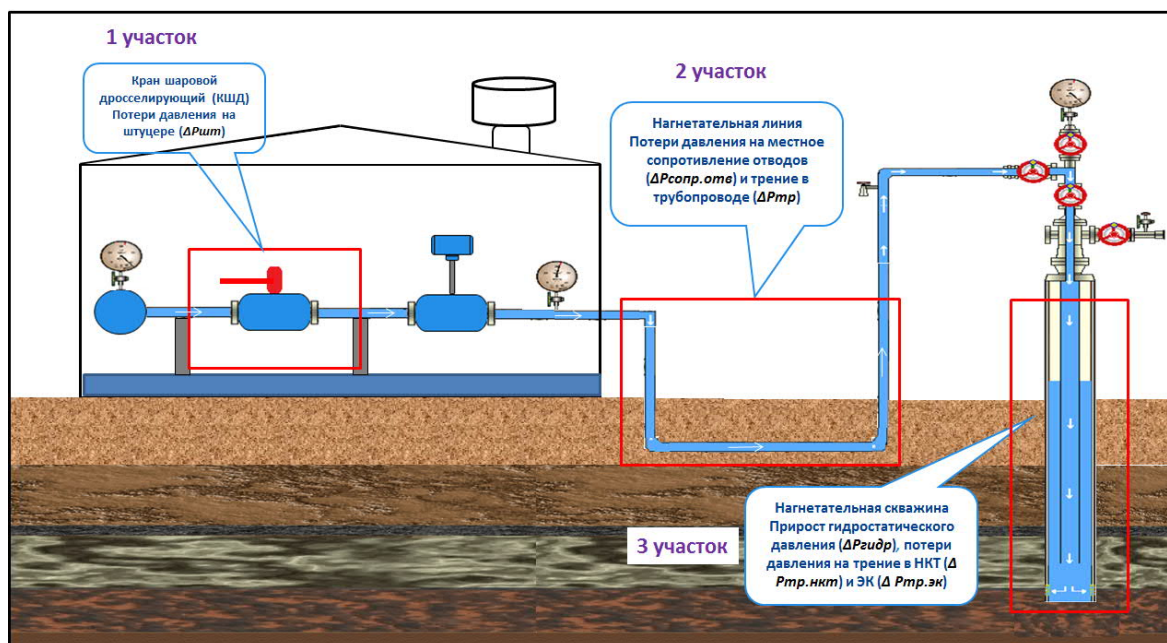


Рис. 2. Схема водораспределительного блока, нагнетательного трубопровода и скважинной компоновки

На 1 участке происходит регулирование давления при помощи сужающего устройства, установленного в шаровом дросселирующем кране. Расчет производится согласно методики.

На следующем участке оказывают влияние потери давления на местные сопротивления элементов трубопровода, т.е. для каждого отвода принимаются значения коэффициента местного сопротивления с последующим расчетом и суммированием в зависимости от количества отводов.

На третьем рассматриваемом участке давление увеличивается за счет веса столба закачиваемой жидкости и рассчитывается согласно методике, при этом учитываются потери давления на трение в насосно - компрессорных трубах (далее – НКТ) и эксплуатационной колонне (далее – ЭК), методика расчета которых одинакова, различия заключаются в диаметрах НКТ и ЭК.

Устьевое ($P_{уст}$, МПа) и забойное давления ($P_{заб}$, МПа) рассчитываются по формулам [3]:

$$P_{уст} = P_{ВРБ} - \Delta P_{шт} - \Delta P_{сопр.отв.} - \Delta P_{тр} \quad (1)$$

где: $P_{ВРБ}$ – давление на водораспределительном блоке, МПа;

$\Delta P_{шт}$ – потери давления на штуцере, МПа;

$\Delta P_{сопр.отв.}$ - потери давления на местные сопротивления (отводы), МПа;

$\Delta P_{тр}$ – потери давления на трение в нагнетательной линии, МПа.

$$P_{заб} = P_{уст} + \Delta P_{гидр} - \Delta P_{тр.нкт} - \Delta P_{тр.ЭК} \quad (2)$$

где: $\Delta P_{гидр}$ – прирост гидростатического давления, МПа ;

$\Delta P_{тр.нкт}$ – потери давления на трение в НКТ, МПа;

$\Delta P_{тр.ЭК}$ – потери давления на трение в ЭК, МПа.

Для верификации расчетов проведен сравнительный анализ рассчитанных давлений с фактическими, полученными при проведении геофизических исследований. Сравнение проведено на 30 нагнетательных скважинах с различными режимами работы. На кросс-плоте (рисунок 4) представлено распределение полученных расчетных результатов с фактическими значениями расчетного и фактического забойного давления показало, что на 28 скважинах погрешность составила не более 5% и на двух скважинах не более 10%.

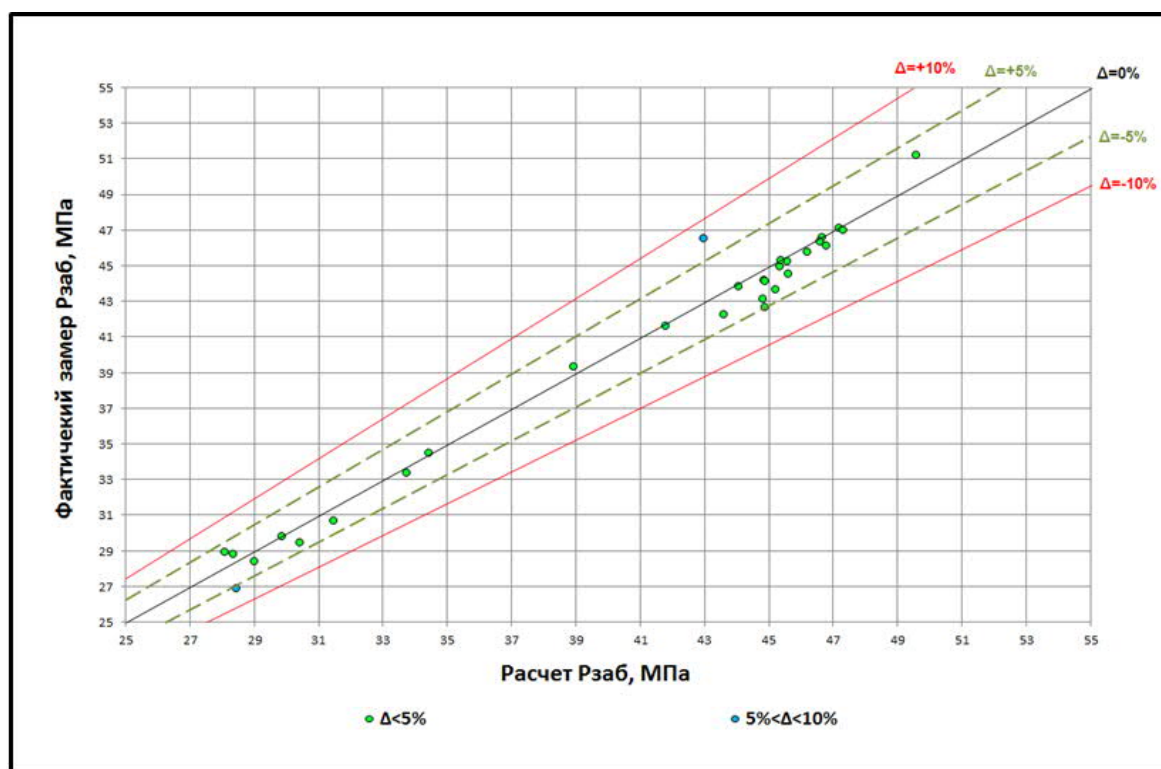


Рис. 3. Кросс-плот отклонения расчетного забойного давления от фактического

Дополнительно проведен анализ чувствительности предложенной методики к различным параметрам, влияющим на достоверность расчетов. Рассмотрим чувствительность расчета в случае отклонений в показаниях счетчика расхода рабочего агента в пласт (рисунок 4).

При первоначальном значении параметра расхода рабочего агента $150 \text{ м}^3/\text{сут}$ и установленном штуцере 4мм расчетное забойное давление составляет 35,79 МПа. При этом доля потерь на трение составляет около 1%, потери давления на штуцере 26%. При увеличении значений расхода на 10 м^3 , доля потерь на трение остается не изменой, при этом доля потерь на штуцере увеличивается на 3%. При уменьшении значений расхода на 10 м^3 , доля потерь на штуцере снижается на 3%. По результатам анализа можно сделать вывод, что при отклонениях показаний расхода закачиваемого агента до 7% расчет забойного давления достоверен.

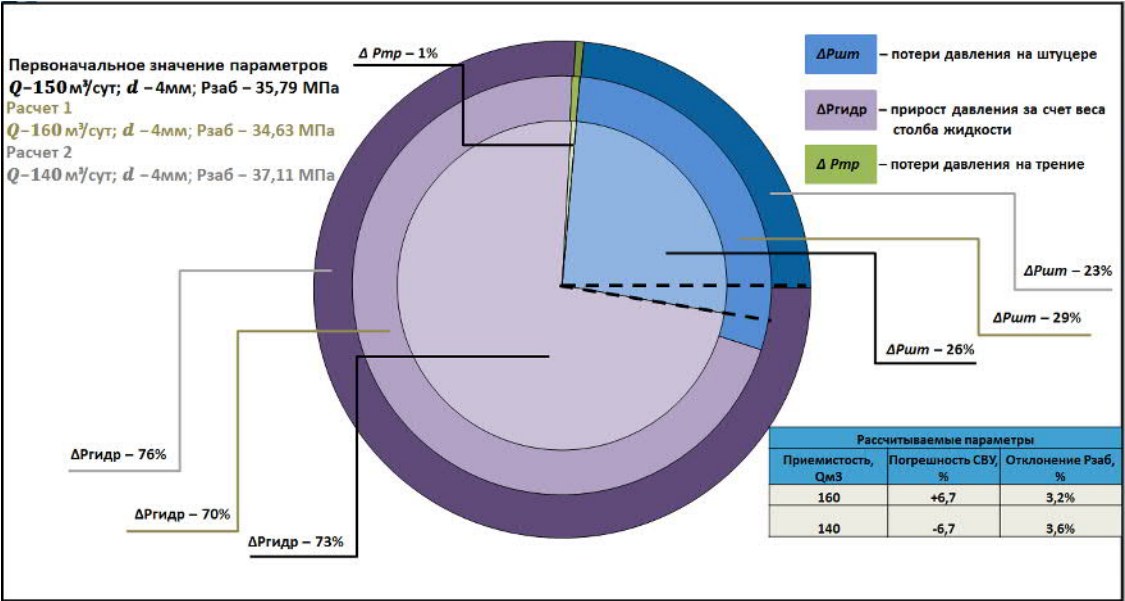


Рис. 4. Анализ чувствительности расчета в зависимости от показаний датчика расхода агента

Далее проанализирована чувствительность расчета от износа штуцера при тех же первоначальных условиях (рисунок 5). При увеличении диаметра штуцера на 5% (диаметр 4,2 мм), потери на штуцере снижаются на 4%, при дальнейшем увеличении диаметра до 10% (диаметр 4,4 мм) потери на штуцере снижаются на 7%. Таким образом, применение данной методики требует контроля состояния штуцерирующих устройств и своевременной их ревизии.

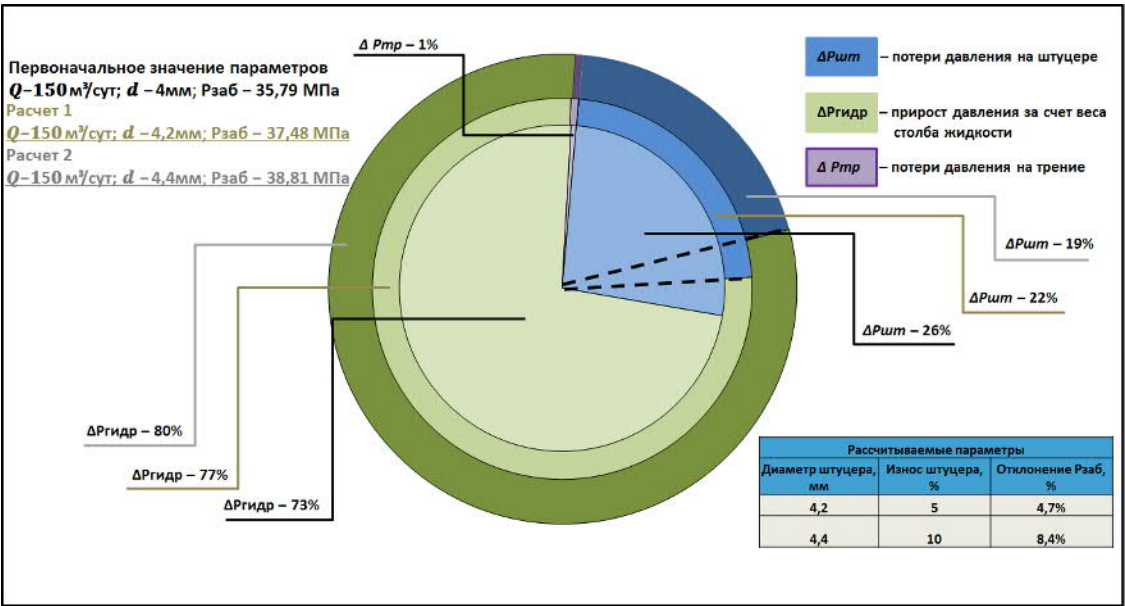


Рис. 5. Анализ чувствительности расчета в зависимости от износа штуцера

На практике при закачке рабочего агента в пласт со временем происходит образование нерастворимого осадка на внутренней поверхности НКТ. Поэтому проведен анализ чувствительности расчета к данному явлению. Для базового расчета принят внутренний диаметр НКТ 62,0 мм. При снижении внутреннего диаметра НКТ до 70% (43,4 мм), отклонение в расчете забойного давления составляет 2,2%. При дальнейшем снижении до 60% (37,2 мм) отклонение в расчете забойного давления составило 5% (рисунок 12). По результатам анализа снижения проходного сечения, предлагаемая методика применима для НКТ с сужением внутреннего диаметра до 60% (37,2 мм).

На основании проделанной работы разработан алгоритм автоматического расчета устьевого и забойного давления (рисунок 6).

Главными условиями для расчета является:

- нагнетательная скважина должна быть в работе;
- расход агента и давление с телемеханики в водораспределительном блоке должны быть больше 0;
- скважина не должна быть оснащена электропогружной установкой перевернутого типа.

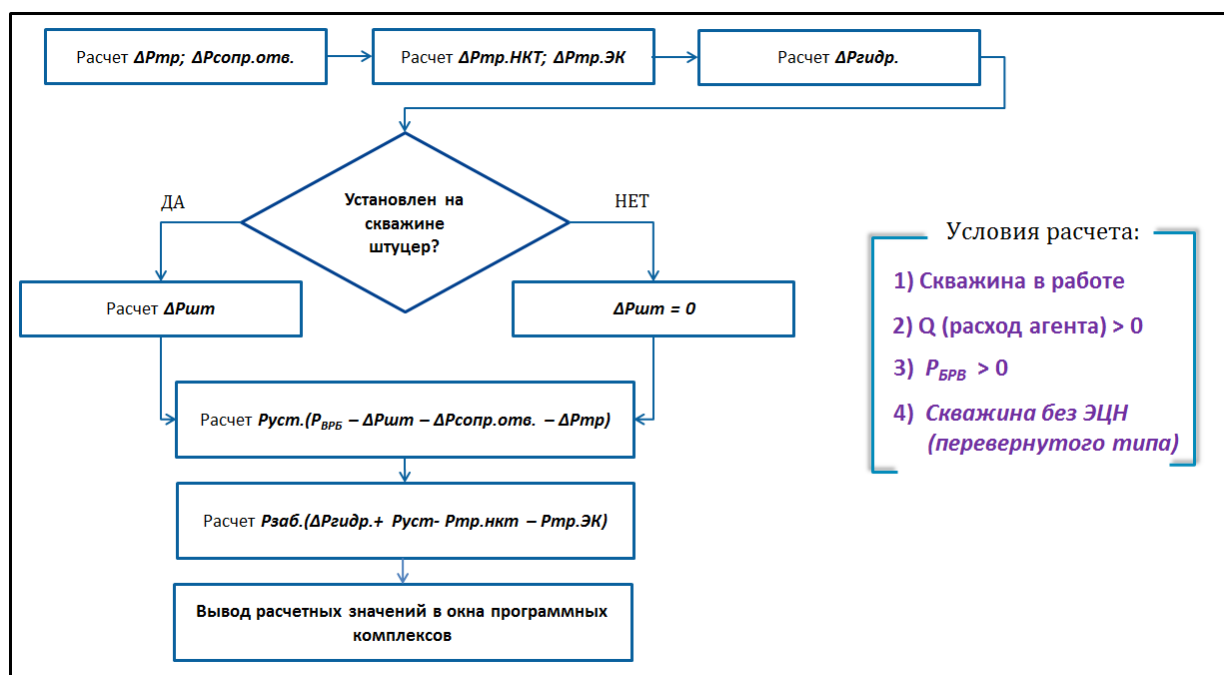


Рис. 6. Алгоритм автоматического расчета забойного давления в работающей скважине

Выводы

Описанная система контроля работы нагнетательных скважин позволит оценить состояние ПЗП на качественном уровне и своевременно принять решение по регулированию работы любой нагнетательной скважины, оперативно запланировать ГДИС или ГИС, сократить негативное влияние «авто-ГРП» на разработку низкопроницаемых коллекторов–, тем самым улучшить технико-экономические показатели разработки.

Список литературы

1. Байков В.А. [и др.] Выбор оптимальной системы разработки для месторождений с низкопроницаемыми коллекторами // Нефтяное хозяйство. 2011. № 1. С. 84-98.
2. А.В.Климов-Каяниди, Р.Т.Алимханов, Е.С.Азуреева, Р.М.Сабитов. Авто-ГРП на нагнетательных скважинах в низкопроницаемых коллекторах ачимовской толщи // Нефть и газ. 2018, №2. С.39-43.
3. И.Ф.Савин, П.В.Сафонов. Основы гидравлики и гидропривод // Издательство «Высшая школа», 1978.