

Российский государственный университет нефти и газа имени И.М.Губкина

Кафедра информационно-измерительных систем

И.С.Ступак

Моделирование процесса седиментации шлама в промывочной жидкости
во время бурения

Методические указания к практическим занятиям по курсу
«Проблемно-ориентированные ИИС в нефтегазовой отрасли»

Москва 2014

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕДИМЕНТАЦИИ ШЛАМА В ПРОМЫВОЧНОЙ ЖИДКОСТИ ВО ВРЕМЯ БУРЕНИЯ

Во время бурения разведочной скважины на нефть в ней постоянно циркулирует поток промывочной жидкости. Первоначально промывочная жидкость рассматривалась только в качестве средства для удаления шлама, однако в настоящее время промывочная жидкость воспринимается в качестве носителя большого объема информации о разрезе скважины. В частности, исследуя минеральный состав шлама, выносимого промывочной жидкостью, возможно составление литологического разреза скважины, что является важнейшей геологической задачей, выполняемой на этапе бурения разведочных скважин.

Своевременный и качественный отбор шлама и его оперативное исследование при проведении геологического контроля имеет большое значение, поэтому ключевая роль отводится методам и аппаратуре предназначенным для оперативного анализа бурового шлама на минеральный состав. Чаще всего для выполнения данного анализа используется метод инфракрасной абсорбционной спектроскопии. Предпосылками к использованию данного метода стали интенсивное развитие приборостроения в области ИК спектроскопии, создание надежных и высокочувствительных ИК-Фурье спектрометров, а также разработка математических методов обработки большого объема экспериментальных данных с помощью ЭВМ. На текущий момент разработано несколько специализированных ИК-анализаторов шлама [1].

Примером одной из последних разработок ИК-анализатора шлама может служить специализированная информационно-измерительная система (ИИС) оперативного инфракрасного анализа минерального состава шлама бурящейся скважины [2]. По своей структуре ИИС состоит из оптической и электронной части (рис. 1). В оптическую часть входят источники излучения, оптический коммутатор, линзовая система, кювета с образцом и приёмники излучения.

Электронная часть состоит из усилителя, полосового фильтра, когерентного амплитудного модулятора, аналого-цифрового преобразователя и микропроцессора.



Рис. 1 Структурная схема информационно-измерительной системы инфракрасного анализа минерального состава шлама

Отбор проб шлама, который производится для исследования на ИК-анализаторе производится следующим образом: шлам отбирают у устья скважины в желобной системе в потоке выходящего бурового раствора с применением шламоотборников постоянного или периодического действия [3]. Шлам для исследования следует отбирать с сетки, на которой задерживаются частицы, а затем, перед помещением в кювету, производить размельчение частиц путем помола в ступке или мельнице.

При использовании подобных ИК-анализаторов неизбежно встает вопрос о привязки результатов исследования определенной частицы шлама к глубине, с которой она была вынесена на поверхность потоком промывочной жидкости.

При проведении любых исследований где в качестве объекта выступает промывочная жидкость или вещества, вынесенные ею следует различать текущие глубины забоя скважины и исправленные глубины для измеренных

геохимических параметров.

Текущей глубиной забоя скважины (Z) называется глубина забоя скважины, регистрируемая глубиномером в момент проведения измерения.

Исправленной глубиной ($Z_{И}$) называют глубину расположения точки пласта, пересеченного скважиной, к которой относится значение геохимического параметра, измеренное при глубине забоя скважины Z .

Для некоторых измеряемых параметров, таких как расход промывочной жидкости на входе и выходе скважины, скорость проходки величины Z и $Z_{И}$ будут совпадают, однако для параметров, регистрируемых на устье скважины путем анализа порции промывочной жидкости (ПЖ) и порции содержащегося в ней шлама всегда соблюдается неравенство $Z > Z_{И}$. Появление этого неравенства обусловлено тем, что на перемещение порции ПЖ с забоя скважины на поверхность по затрубному пространству затрачивается определенное время в течение которого производится бурение и скважина углубляется.

Исправленная глубина для геохимических параметров $Z_{И}$ представляет собой разность глубины Z и приращения глубины забоя скважины за время перемещения порции ПЖ от забоя до устья скважины ΔZ , называемого величиной отставания по глубинам.

$$Z_{И} = Z - \Delta Z, \quad (1)$$

где $Z_{И}$, Z и ΔZ — выражены в метрах.

Принимая во внимание приведенное определение величины ΔZ и переводя соответствующие единицы измерения следует:

$$\Delta Z = 1,66 \cdot 10^{-2} \cdot v_{\delta} \cdot t_{om}, \quad (2)$$

где v_6 — средняя скорость бурения в течение интервала времени $t_{от}$;

$t_{от}$ — отставание по времени (интервал времени, в течение которого забойная порция ПЖ переместится от забоя до устья скважины), мин.

При этом за интервал времени $t_{от}$ из скважины будет эвакуирована ПЖ в объеме, равном всему объему затрубного пространства скважины, что можно записать следующим образом:

$$t_{от} = \frac{16,6 \cdot V_C}{Q_{вых}}, \quad (3)$$

где V_C — объем затрубного пространства скважины, м³;

$Q_{вых}$ — расход промывочной жидкости на выходе из скважины, л/сек.

Подставив выражение (3) в выражение (2) получим:

$$\Delta Z = \frac{27,6 \cdot 10^{-2} \cdot v_6 \cdot V_C}{Q_{вых}}, \quad (4)$$

При этом во время определения величины приращения глубины скважины ΔZ следует периодически экспериментально определять и корректировать величины V_C и $Q_{вых}$. Это требование связано с непостоянством величин V_C и $Q_{вых}$. В частности, объем затрубного пространства может изменяться из-за наличия каверн, а расход промывочной жидкости на выходе из скважины может быть непостоянен из-за поглощения фильтрата ПЖ при пересечении скважиной проницаемых горизонтов, изменения числа работающих буровых насосов и режима их работы.

Все вышесказанное относится к движению ПЖ по затрубному пространству от забоя на поверхность. Однако частицы шлама, попавшие в ПЖ при разбурировании породы долотом движутся на поверхность с отставанием от той

порции ПЖ в которую они первоначально попали.

Это связано с процессом седиментации — оседания частиц дисперсной фазы в жидкости или газе под действием гравитационного поля или центробежных сил. В общем виде скорость седиментации зависит от массы, размера, формы и плотности вещества частицы, вязкости и плотности среды, а также от ускорения, силы тяжести и действующих на частицы центробежных сил.

Поэтому при решении вопроса о привязке шлама, отбираемого для проведения ИК-анализа необходимо учитывать не только перемещение ПЖ в затрубном пространстве скважины, но и перемещение частиц шлама в столбе ПЖ.

Обычно в процессе седиментации частиц шлама обтекание ПЖ происходит в турбулентном режиме и скорость седиментации (в см/с) вычисляют по формуле Риттингера [4]:

$$v_c = k_\phi \cdot \sqrt{d_p \cdot \frac{\sigma_n - \sigma_{ж}}{\sigma_{ж}}}, \quad (5)$$

где k_ϕ — коэффициент, зависящий от формы частиц шлама;

d_p — диаметр шара, равновесного частице неправильной формы с максимальными габаритами $b_{чш}$ в см;

σ_n — плотность шлама в г/см³;

$\sigma_{ж}$ — плотность ПЖ в г/см³.

Как видно из данного выражения скорость седиментации частиц шлама в ПЖ v_c прямо пропорциональна её габаритам $b_{чш}$. Поскольку технически невозможно определять размер каждой отобранной частицы шлама и вычислять её скорость седиментации в ПЖ для обеспечения привязки шлама к соответствующей глубине принято разделять шлам на три габаритные фракции с $b_{чш} \leq 2,9$ мм (фракция Φ_1), с $3 \leq b_{чш} \leq 5$ мм (фракция Φ_2) и $b_{чш} \geq 5,1$ мм (фракция Φ_3). Соответственно частицы каждой фракции в заданном диапазоне величин σ_n и

$\sigma_{ж}$ характеризуются определенной средней скоростью седиментации частиц v_c с заданным разбросом (обычно 20%).

Для расчета скорости седиментации каждой габаритной фракции по формуле Риттингера (5) принято считать $k_{\phi} = 20$, а d_p для фракции Φ_1 — 2 мм, для фракции Φ_2 — 3,5 мм и для фракции Φ_3 — 5,5 мм.

Учитывая то, что все параметры, а это текущая глубина забоя скважины, скорость и расход ПЖ на выходе из скважины, плотность ПЖ, плотность шлама известны или могут быть измерены возможно производить расчет и регистрацию исправленной глубины для каждой габаритной фракции шлама в процессе их отбора с вибросит.

В частности, разработана система моделирования процесса седиментации фракций шлама в ПЖ во время бурения (рис. 2).

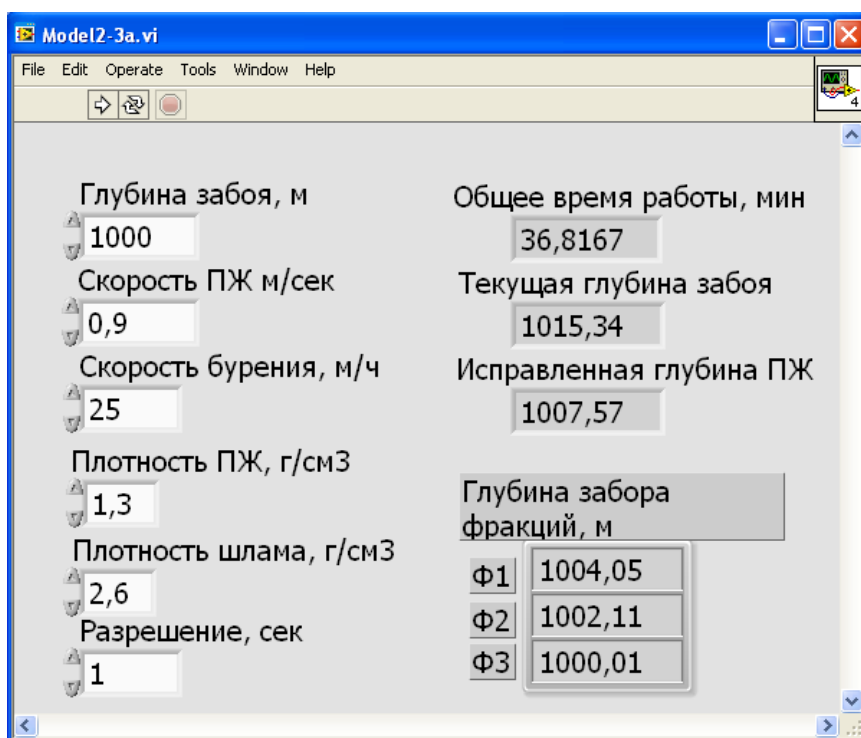


Рис. 2 Система моделирования процесса седиментации фракций шлама в ПЖ во время бурения.

Начальными (задаваемыми) параметрами модели являются глубина забоя на момент формирования порции ПЖ с частицами шлама, скорость ПЖ, скорость бурения, плотность ПЖ, плотность шлама и разрешение (частота дискретизации).

Для расчета необходимо указать начальные параметры и нажать кнопку запуска (символ стрелки на панели инструментов). Начальные параметры включают:

- *Начальную глубину забоя, м*

Глубина скважины на момент начала движения условной порции ПЖ от забоя к поверхности. Большинство продуктивных нефте- и газоносных пластов находятся на глубинах между 1 и 6 км.

- *Скорость движения ПЖ, м/сек*

Обычно скорость восходящего потока ПЖ равна 0,6 — 1 м/с

- *Скорость бурения, м/ч*

Скорость проходки зависит от различных факторов и может сильно варьироваться, например от 3 до 30 м/час

- *Плотность ПЖ, г/см³*

Плотность ПЖ выбирается с учетом величины пластового давления, поскольку ПЖ должна обеспечить компенсацию пластового давления флюидов проявляющих горизонтов и не допустить нарушения целостности стенок скважины в породах. Плотность ПЖ обычно составляет 1,3 — 1,5 г/см³

- *Плотность шлама, г/см³*

Плотность шлама зависит от разбуриваемой породы. Например, песчаник имеет плотность 1,9 — 2,3 г/см³, а глина 1,6 — 1,8 г/см³

- *Разрешение, сек*

Служебный параметр (частота дискретизации), устанавливает то, с каким временным интервалом производится расчет. Рекомендуется устанавливать в пределах 1 — 10 сек

Расчет заканчивается в момент подъема на устье габаритной фракции Φ_3 ,

поскольку она имеет наибольший габарит $b_{\text{чш}}$ и её время подъема на поверхность является наибольшим.

Результаты расчета представляют собой:

- *Время выхода на поверхность самой объемной габаритной фракции Φ_3 («Общее время работы»), мин;*
- *Текущая глубина забоя, м;*
- *Исправленная глубина ПЖ, м;*
- *Исправленная глубина каждой габаритной фракции Φ_n .*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕДИМЕНТАЦИИ ШЛАМА В ПРОМЫВОЧНОЙ ЖИДКОСТИ ВО ВРЕМЯ БУРЕНИЯ

Во время бурения разведочной скважины на нефть в ней постоянно циркулирует поток промывочной жидкости. Первоначально промывочная жидкость рассматривалась только в качестве средства для удаления шлама, однако в настоящее время промывочная жидкость воспринимается в качестве носителя большого объема информации о разрезе скважины. В частности, исследуя минеральный состав шлама, выносимого промывочной жидкостью, возможно составление литологического разреза скважины, что является важнейшей геологической задачей, выполняемой на этапе бурения разведочных скважин.

Своевременный и качественный отбор шлама и его оперативное исследование при проведении геологического контроля имеет большое значение, поэтому ключевая роль отводится методам и аппаратуре предназначенным для оперативного анализа бурового шлама на минеральный состав. Чаще всего для выполнения данного анализа используется метод инфракрасной абсорбционной спектроскопии. Предпосылками к использованию данного метода стали интенсивное развитие приборостроения в области ИК спектроскопии, создание надежных и высокочувствительных ИК-Фурье спектрометров, а также разработка математических методов обработки большого объема экспериментальных данных с помощью ЭВМ. На текущий момент разработано несколько специализированных ИК-анализаторов шлама [1].

Примером одной из последних разработок ИК-анализатора шлама может служить специализированная информационно-измерительная система (ИИС) оперативного инфракрасного анализа минерального состава шлама бурящейся скважины [2]. По своей структуре ИИС состоит из оптической и электронной части (рис. 1). В оптическую часть входят источники излучения, оптический коммутатор, линзовая система, кювета с образцом и приёмники излучения.

Электронная часть состоит из усилителя, полосового фильтра, когерентного амплитудного модулятора, аналого-цифрового преобразователя и микропроцессора.



Рис. 1 Структурная схема информационно-измерительной системы инфракрасного анализа минерального состава шлама

Отбор проб шлама, который производится для исследования на ИК-анализаторе производится следующим образом: шлам отбирают у устья скважины в желобной системе в потоке выходящего бурового раствора с применением шламоотборников постоянного или периодического действия [3]. Шлам для исследования следует отбирать с сетки, на которой задерживаются частицы, а затем, перед помещением в кювету, производить размельчение частиц путем помола в ступке или мельнице.

При использовании подобных ИК-анализаторов неизбежно встает вопрос о привязки результатов исследования определенной частицы шлама к глубине, с которой она была вынесена на поверхность потоком промывочной жидкости.

При проведении любых исследований где в качестве объекта выступает промывочная жидкость или вещества, вынесенные ею следует различать текущие глубины забоя скважины и исправленные глубины для измеренных

геохимических параметров.

Текущей глубиной забоя скважины (Z) называется глубина забоя скважины, регистрируемая глубиномером в момент проведения измерения.

Исправленной глубиной ($Z_{И}$) называют глубину расположения точки пласта, пересеченного скважиной, к которой относится значение геохимического параметра, измеренное при глубине забоя скважины Z .

Для некоторых измеряемых параметров, таких как расход промывочной жидкости на входе и выходе скважины, скорость проходки величины Z и $Z_{И}$ будут совпадают, однако для параметров, регистрируемых на устье скважины путем анализа порции промывочной жидкости (ПЖ) и порции содержащегося в ней шлама всегда соблюдается неравенство $Z > Z_{И}$. Появление этого неравенства обусловлено тем, что на перемещение порции ПЖ с забоя скважины на поверхность по затрубному пространству затрачивается определенное время в течение которого производится бурение и скважина углубляется.

Исправленная глубина для геохимических параметров $Z_{И}$ представляет собой разность глубины Z и приращения глубины забоя скважины за время перемещения порции ПЖ от забоя до устья скважины ΔZ , называемого величиной отставания по глубинам.

$$Z_{И} = Z - \Delta Z, \quad (1)$$

где $Z_{И}$, Z и ΔZ — выражены в метрах.

Принимая во внимание приведенное определение величины ΔZ и переводя соответствующие единицы измерения следует:

$$\Delta Z = 1,66 \cdot 10^{-2} \cdot v_{\delta} \cdot t_{om}, \quad (2)$$

где v_6 — средняя скорость бурения в течение интервала времени $t_{от}$;

$t_{от}$ — отставание по времени (интервал времени, в течение которого забойная порция ПЖ переместится от забоя до устья скважины), мин.

При этом за интервал времени $t_{от}$ из скважины будет эвакуирована ПЖ в объеме, равном всему объему затрубного пространства скважины, что можно записать следующим образом:

$$t_{от} = \frac{16,6 \cdot V_C}{Q_{вых}}, \quad (3)$$

где V_C — объем затрубного пространства скважины, м³;

$Q_{вых}$ — расход промывочной жидкости на выходе из скважины, л/сек.

Подставив выражение (3) в выражение (2) получим:

$$\Delta Z = \frac{27,6 \cdot 10^{-2} \cdot v_6 \cdot V_C}{Q_{вых}}, \quad (4)$$

При этом во время определения величины приращения глубины скважины ΔZ следует периодически экспериментально определять и корректировать величины V_C и $Q_{вых}$. Это требование связано с непостоянством величин V_C и $Q_{вых}$. В частности, объем затрубного пространства может изменяться из-за наличия каверн, а расход промывочной жидкости на выходе из скважины может быть непостоянен из-за поглощения фильтрата ПЖ при пересечении скважиной проницаемых горизонтов, изменения числа работающих буровых насосов и режима их работы.

Все вышесказанное относится к движению ПЖ по затрубному пространству от забоя на поверхность. Однако частицы шлама, попавшие в ПЖ при разбурировании породы долотом движутся на поверхность с отставанием от той

порции ПЖ в которую они первоначально попали.

Это связано с процессом седиментации — оседания частиц дисперсной фазы в жидкости или газе под действием гравитационного поля или центробежных сил. В общем виде скорость седиментации зависит от массы, размера, формы и плотности вещества частицы, вязкости и плотности среды, а также от ускорения, силы тяжести и действующих на частицы центробежных сил.

Поэтому при решении вопроса о привязке шлама, отбираемого для проведения ИК-анализа необходимо учитывать не только перемещение ПЖ в затрубном пространстве скважины, но и перемещение частиц шлама в столбе ПЖ.

Обычно в процессе седиментации частиц шлама обтекание ПЖ происходит в турбулентном режиме и скорость седиментации (в см/с) вычисляют по формуле Риттингера [4]:

$$v_c = k_\phi \cdot \sqrt{d_p \cdot \frac{\sigma_n - \sigma_{ж}}{\sigma_{ж}}}, \quad (5)$$

где k_ϕ — коэффициент, зависящий от формы частиц шлама;

d_p — диаметр шара, равновесного частице неправильной формы с максимальными габаритами $b_{чш}$ в см;

σ_n — плотность шлама в г/см³;

$\sigma_{ж}$ — плотность ПЖ в г/см³.

Как видно из данного выражения скорость седиментации частиц шлама в ПЖ v_c прямо пропорциональна её габаритам $b_{чш}$. Поскольку технически невозможно определять размер каждой отобранной частицы шлама и вычислять её скорость седиментации в ПЖ для обеспечения привязки шлама к соответствующей глубине принято разделять шлам на три габаритные фракции с $b_{чш} \leq 2,9$ мм (фракция Φ_1), с $3 \leq b_{чш} \leq 5$ мм (фракция Φ_2) и $b_{чш} \geq 5,1$ мм (фракция Φ_3). Соответственно частицы каждой фракции в заданном диапазоне величин σ_n и

$\sigma_{ж}$ характеризуются определенной средней скоростью седиментации частиц v_c с заданным разбросом (обычно 20%).

Для расчета скорости седиментации каждой габаритной фракции по формуле Риттингера (5) принято считать $k_{\phi} = 20$, а d_p для фракции Φ_1 — 2 мм, для фракции Φ_2 — 3,5 мм и для фракции Φ_3 — 5,5 мм.

Учитывая то, что все параметры, а это текущая глубина забоя скважины, скорость и расход ПЖ на выходе из скважины, плотность ПЖ, плотность шлама известны или могут быть измерены возможно производить расчет и регистрацию исправленной глубины для каждой габаритной фракции шлама в процессе их отбора с вибросит.

В частности, разработана система моделирования процесса седиментации фракций шлама в ПЖ во время бурения (рис. 2).

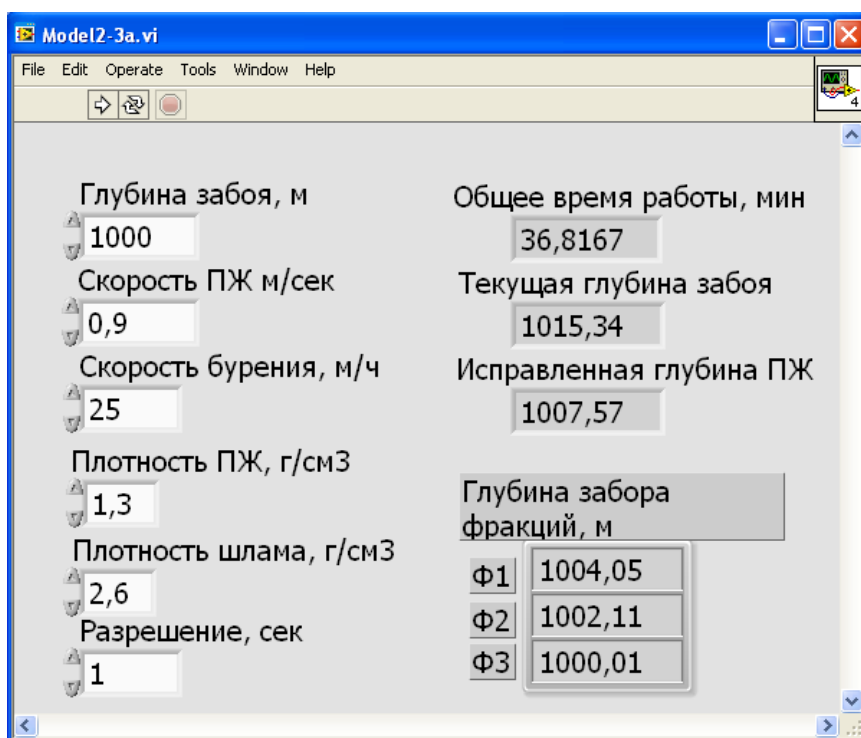


Рис. 2 Система моделирования процесса седиментации фракций шлама в ПЖ во время бурения.

Начальными (задаваемыми) параметрами модели являются глубина забоя на момент формирования порции ПЖ с частицами шлама, скорость ПЖ, скорость бурения, плотность ПЖ, плотность шлама и разрешение (частота дискретизации).

Для расчета необходимо указать начальные параметры и нажать кнопку запуска (символ стрелки на панели инструментов). Начальные параметры включают:

- *Начальную глубину забоя, м*

Глубина скважины на момент начала движения условной порции ПЖ от забоя к поверхности. Большинство продуктивных нефте- и газоносных пластов находятся на глубинах между 1 и 6 км.

- *Скорость движения ПЖ, м/сек*

Обычно скорость восходящего потока ПЖ равна 0,6 — 1 м/с

- *Скорость бурения, м/ч*

Скорость проходки зависит от различных факторов и может сильно варьироваться, например от 3 до 30 м/час

- *Плотность ПЖ, г/см³*

Плотность ПЖ выбирается с учетом величины пластового давления, поскольку ПЖ должна обеспечить компенсацию пластового давления флюидов проявляющих горизонтов и не допустить нарушения целостности стенок скважины в породах. Плотность ПЖ обычно составляет 1,3 — 1,5 г/см³

- *Плотность шлама, г/см³*

Плотность шлама зависит от разбуриваемой породы. Например, песчаник имеет плотность 1,9 — 2,3 г/см³, а глина 1,6 — 1,8 г/см³

- *Разрешение, сек*

Служебный параметр (частота дискретизации), устанавливает то, с каким временным интервалом производится расчет. Рекомендуется устанавливать в пределах 1 — 10 сек

Расчет заканчивается в момент подъема на устье габаритной фракции Φ_3 ,

поскольку она имеет наибольший габарит $b_{\text{чш}}$ и её время подъема на поверхность является наибольшим.

Результаты расчета представляют собой:

- *Время выхода на поверхность самой объемной габаритной фракции Φ_3 («Общее время работы»), мин;*
- *Текущая глубина забоя, м;*
- *Исправленная глубина ПЖ, м;*
- *Исправленная глубина каждой габаритной фракции Φ_n .*

1. Моисеенко А.С., Егорова И.В. Инфракрасные спектральные ИИС исследования горных пород. М.: ППП «Типография «Наука», 2013. - 194 с.
2. Моисеенко А.С., Командровский В.Г., Ступак И.С. Специализированная информационно-измерительная система оперативного инфракрасного анализа минерального состава шлама бурящейся скважины. // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2014. № 2. С. 7-9.
3. Жданов М. А. Нефтегазопромысловая геология и подсчет запасов нефти и газа. М.: изд-во "Недра", 1970. 488 с.
4. Померанц Л.И. Газовый каротаж. М.: Недра, 1982. 240 с.