

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2018, №6, Том 10 / 2018, No 6, Vol 10 <https://esj.today/issue-6-2018.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/28SAVN618.pdf>

Статья поступила в редакцию 22.10.2018; опубликована 11.12.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Панасенко Н.Л., Анисимова Е.Ю., Цырендашиев Н.Б., Цыбуля И.И., Яснюк Т.И., Вязкова Е.А. Применение уравнения материального баланса при разведке нефтяных и газовых месторождений // Вестник Евразийской науки, 2018 №6, <https://esj.today/PDF/28SAVN618.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Panasenko N.L., Anisimova E.Yu., Tsyrendashiev N.B., Tsybulya I.I., Yasnyuk T.I., Vyazkova E.A. (2018). Application of the material balance equation in the exploration of oil and gas fields. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 6(10). Available at: <https://esj.today/PDF/28SAVN618.pdf> (in Russian)

УДК 550.8:553.3/.9

ГРНТИ 38.57.19

Панасенко Наталья Леонидовна

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
Студент 4-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии» – бакалавр
E-mail: natasha--0@mail.ru

Анисимова Екатерина Юрьевна

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
Студент 4-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии» – бакалавр
E-mail: anisimova.eiu@mail.ru

Цырендашиев Насаг Баторович

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
Студент 4-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии» – бакалавр
E-mail: nasag97@mail.ru

Цыбуля Ирина Игоревна

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
Студент 4-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии» – бакалавр
E-mail: irinatsybulya0205@mail.ru

Яснюк Татьяна Игоревна

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
Студент 4-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии» – бакалавр
E-mail: tanya_yasnyuk@mail.ru

Вязкова Елизавета Андреевна

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
Студент 4-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии» – бакалавр
E-mail: vyazkova.elizaweta@yandex.ru

Применение уравнения материального баланса при разведке нефтяных и газовых месторождений

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы, связанные с противоречиями, возникающими при выборе метода оценки запасов месторождения, а именно сравнение преимуществ методов оценки запасов с помощью уравнения материального баланса и

современных средств численного моделирования. В работе приводится аргументация в пользу применения комбинации этих методов, где современными средствами моделирования предлагается применять в качестве дополнительного инструмента уточнения и подтверждения данных по производительности отдельных скважин, а также создания прогноза по уровню извлекаемых запасов. В тоже время метод применения уравнения материального баланса предлагается как основа для определения общих запасов как в нефтяном, так и в газовом месторождении через построение графических зависимостей решения уравнения. Кроме того, в работе рассмотрен метод, позволяющий проанализировать наличие того или иного механизма вытеснения пластового флюида в область добывающей скважины и таким образом дать оценку пригодности месторождения к коммерческой эксплуатации. В работе подробно рассмотрены различные комбинации механизмов вытеснения пластового флюида как в нефтяных, так и в газовых месторождениях. Важным акцентом работы является метод определения наличия в резервуаре активного подпора водоносного горизонта, а также оценка степени его активности, то есть возможности и скорости замещения пластового флюида водой водоносного горизонта. Применение этого метода рассмотрено в резервуарах нефти и газа, где кроме обозначенного механизма замещения ярко выражены другие составляющие компенсации давления, такие как расширение нефти и растворенного в ней газа, расширение газа газовой шапки, а также расширение газа в газовом месторождении.

Вклад авторов.

Панасенко Наталья Леонидовна – автор внес главный вклад в написание статьи. Ему принадлежит идея статьи. Производил перевод зарубежной литературы. Принимал участие в написании статьи. Производил координацию работы научного коллектива.

Анисимова Екатерина Юрьевна – автор оказывал участие в написании статьи. Производил создание графического материала. Одобрил окончательную версию статьи перед её подачей для публикации.

Цырендашиев Насаг Баторович – автор оказывал участие в поиске общей информации для написания статьи. Производил перевод зарубежной литературы. Собрал, проанализировал и сгруппировал информацию для включения в текст статьи.

Вязкова Елизавета Андреевна – автор оказывал участие в поиске общей информации для написания статьи. Производил перевод зарубежной литературы. Собрал, проанализировал и сгруппировал информацию для включения в текст статьи.

Яснюк Татьяна Игоревна – автор оказывал координацию членов коллектива по поиску информации. Производил поиск информации по вопросу, поднятому в статье, в русскоязычной литературе.

Цыбуля Ирина Игоревна – автор оказывал участие в поиске общей информации для написания статьи. Собрал, проанализировал и сгруппировал информацию для включения в текст статьи

Ключевые слова: уравнение материального баланса; оценка запасов; месторождение нефти; месторождение газа; механизм вытеснения; пластовый флюид; подпор водоносного горизонта

Введение

В данной работе будут рассмотрено применение уравнения материального баланса к различным типам коллектора, а также методы, разрабатываемы для прогнозирования производительности коллектора. Важно отметить, что на практике не существует ни одного

универсального решения уравнения материального баланса, поэтому его решения должны рассматриваться в качестве приложений к конкретному типу коллектора и содержащегося в нем пластового флюида. В последние годы развитие вычислительных мощностей и современных средств аналитической оценки и моделирования, таких как, например, численное моделирование, заставляет многих усомниться в эффективности применения материального баланса для оценки производительности месторождения.

Тем не менее на сегодняшний день остается множество сторонников подхода применения материального баланса. Так в [1] говорится, что отказ от применения концепции материального равновесия на нефтяных месторождениях может стать трагедией, так как лишит инженеров их самого главного инструмента для исследования и понимания резервуаров. В работе предлагается подход к устранению конкуренции между применением уравнений материального баланса и численного моделирования и их совместному применению. Таким образом предлагается использовать сильные стороны уравнения материального баланса в качестве инструмента сопоставления истории разработки месторождения, а также достоинства систем численного моделирования в области предсказания дальнейших темпов добычи [2].

Линейные формы уравнения материального баланса

Короткая версия уравнения материального баланса

Уравнение материального баланса само по себе не является сложной для анализа концепцией. Трудности лежат в применении уравнения к реальным задачам коллектора. Главной проблемой, с которой, как правило, сталкивается инженер является неполное понимание резервуара, которое препятствует идентификации степени вовлечения механизмов вытеснения пластового флюида, так как в большинстве резервуаров представлена комбинация механизмов вытеснения.

Главной проблемой, поставленной в исследованиях [3] является снижение влияния вышеуказанного фактора. Их метод состоит в переупорядочивании уравнения материального баланса, чтобы получить уравнение прямой линии. Метод предусматривает отображение переменной группы по сравнению с другой переменной группой, которая выбирается в зависимости от механизма вытеснения пластового флюида в резервуаре. Главным достоинством такой методики является то, что если линейная зависимость не существует для конкретной интерпретации уравнения материального баланса, то это отклонение от линейности предполагает, что сам резервуар не соответствует предполагаемым условиям и, соответственно, присутствуют и другие механизмы вытеснения.

После достижения линейности, основанной на сопоставлении давления и данных добычи, создается математическая модель. Такой метод называется сопоставлением истории добычи. В этом случае создание математической модели в будущем позволит спрогнозировать дальнейшую производительность пласта.

Уравнение материального баланса может быть записано в следующем виде:

$$N_p [B_o + (R_p - R_s) B_g] + W_p B_w = N [(B_o - B_{oi}) + (R_{si} - R_s) B_g] + m N B_{oi} \left(\frac{B_g}{B_{gi}} - 1 \right) + \frac{(1+m) N B_{oi} (c_w S_{wc} + c_f) \Delta p}{(1 - S_{wc})} \quad (1)$$

В исследованиях [4] уравнение упрощено до короткой формы:

$$F = N E_o + N m E_g + N E_{fw} + W_e \quad (2)$$

Правая часть уравнения включает в себя:

- 1) Расширение нефти и растворенного в ней газа E_o :

$$E_o = B_o - B_{oi} + (R_{si} - R_s) B_g \quad (3)$$

- 2) Расширение матрицы (породы) коллектора и воды E_{fw} :

$$E_{fw} = (1+m) \frac{B_{oi}}{1-S_{wc}} (c_f + S_{wc} c_w) \Delta p \quad (4)$$

- 3) Расширение газовой шапки E_g :

$$E_g = B_{oi} \left(\frac{B_g}{B_{gi}} - 1 \right) \quad (5)$$

Здесь важно отметить, что уравнение (2) не учитывает какие-либо методы поддержания пластового давления (закачивание воды или газа в газовую шапку).

Отсутствие механизма вытеснения пластового флюида водой и отсутствие первичной газовой шапки

В условиях отсутствия подпора со стороны подстилающих пластовых вод и отсутствия первоначальной газовой шапки составляющие уравнения материального баланса We и Nm равны нулю. Следовательно, уравнение принимает следующий вид:

$$F = NE_o \quad (6)$$

Таким образом, основным механизмом вытеснения пластового флюида из резервуара остается механизм расширения нефти и первоначально растворенного в ней газа. В случае с графиком функции механизма вытеснения зависимость примет вид прямой линии, проходящей через начало координат (рисунок 1).

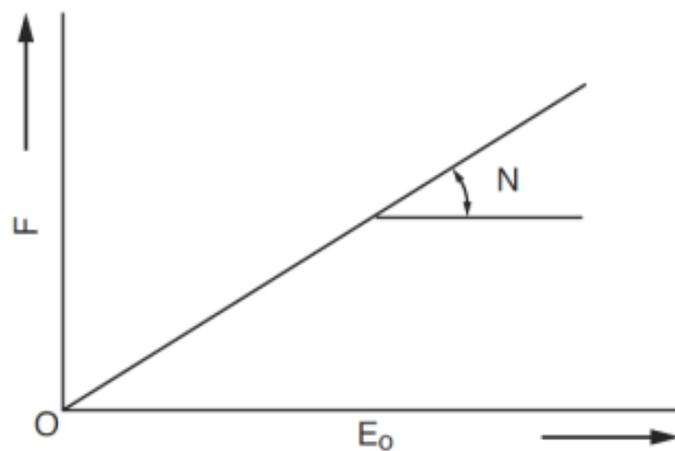


Рисунок 1. Графическое представление уравнения материального баланса в условиях отсутствия подпора подстилающими грунтовыми водами и отсутствия газовой шапки (составлено авторами)

Этот тип зависимости является наиболее простым и по своей сути представляет собой отношение наблюдаемого уровня добычи к определенным в процесс исследования пласта

параметра давления, объема и температуры. Таким образом наклон линии дает представление о количестве нефти в продуктивном сегменте N.

Механизм вытеснения пластового флюида за счет расширения газа газовой шапки при известных параметрах газовой шапки и отсутствии механизма вытеснения водой

В такого типа системах составляющая We равна нулю. Если объем газовой шапки известен и равен m , то уравнение материального баланса примет следующий вид:

$$F = N(E_o + mE_g) \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что график уравнения должен представлять собой прямую, проходящую через начало координат с наклоном N . Интересной возможностью, по нашему мнению, может стать поиск объема газовой шапки с помощью перебора большого количества значений. В том случае, когда неизвестен фактический объем газовой шапки m его можно определить аналитически с помощью подбора этого значения. В этом случае предлагается составить программу для ЭВМ, которая позволит произвести перебор большого количества значений в течении короткого времени и получить ответ с высокой (необходимой степенью точности). Как можно увидеть (рисунок 2) при подстановке значения объема газовой шапки, превышающего фактическое значение график полученной зависимости будет отходить от линейного в область более высокого дебита, и наоборот при подстановке значения, меньшего чем фактический объем газовой шапки мы получим кривую, отклоняющуюся от прямой линии в сторону более низких дебитов. Так при использовании средств вычислительной техники появится возможность получения значения с необходимой степенью точности. Такие механизмы сейчас применяются в численном моделировании разработки месторождений нефти и газа, но на сегодняшний день остается открытым вопрос применения численного анализа для уравнения материального баланса.

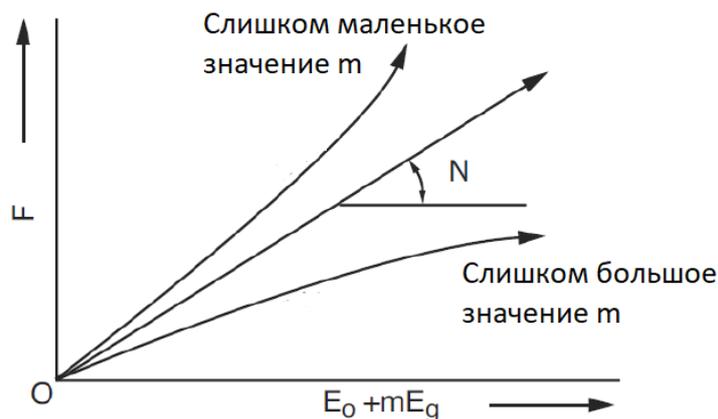


Рисунок 2. Графическое представление уравнения материального баланса для механизма вытеснения за счет расширения газа газовой шапки (составлено авторами)

Другие механизмы вытеснения

Определение того, источника энергии, который способствует вытеснению пластового флюида из пространства коллектора, то есть определение механизма вытеснения, чрезвычайно важно для понимания поведения резервуара в процессе добычи и предсказания уровня извлечения из него углеводородов. Уравнение материального баланса может быть использовано для получения информации о том, как происходит вытеснение и замещение пластового флюида внутри пространства коллектора. Так применение уравнения в его кратком

виде может дать основание полагать происходит ли истощение энергии вытеснения, пропорциональное объему извлекаемого флюида или же в резервуаре есть источники дополнительной энергии, поддерживающие систему такие, как, например, активные подстилающие воды или происходит расширение газовой шапки [5].

Рассмотрим резервуар, в котором не известно наличие поддерживающего водоносного горизонта, но существует возможность его нахождения и, соответственно, поддержки давления за счет замещения вытесняемой нефти водой. Воспользуемся краткой версией уравнения материального баланса:

$$F = N(E_o + E_{fw}) + W_e \quad (8)$$

Если разделить обе части уравнения (8) на $E_o + E_{fw}$, то получим:

$$\frac{F}{E_o + E_{fw}} = N + \frac{W_e}{E_o + E_{fw}} \quad (9)$$

В работе [6] указывается, что правая часть уравнения (9) имеет два неизвестных N и W_e . Такая форма уравнению по мнению авторов является мощным инструментом для оценки наличия поддерживающего водоносного горизонта или его отсутствия. Этот метод предполагает построение зависимости левой части уравнения от N_p или от времени падения давления ΔP . Форма графика будет зависеть от наличия различного типа энергии вытеснения (рисунок 3).

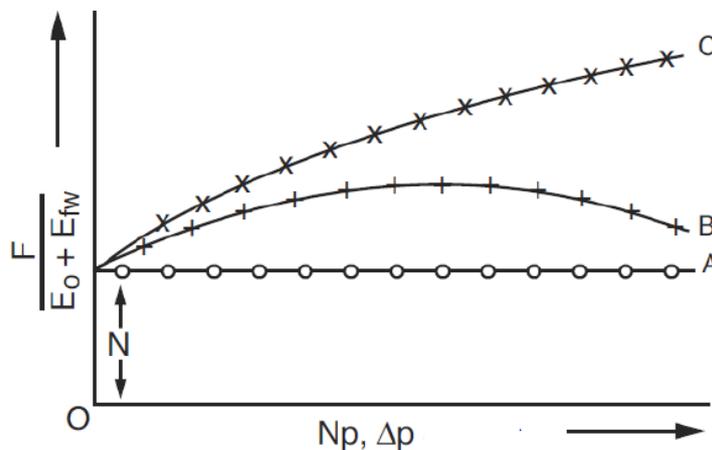


Рисунок 3. Определение механизма вытеснения (составлено авторами)

Примеры на рисунке 3 иллюстрируют различные сценарии результатов построения производственных показателей. Так зависимость А, представленная горизонтальной линией, указывает на то, что левая и правая стороны постоянны, то есть $W_e=0$, а сжимаемость порового пространства постоянна. В таком случае, очевидно, что энергия для вытеснения пластового флюида поступает только за счет расширения нефти и растворенного в ней на начальном этапе разработки газа. В данном случае как уже упоминалось ранее наклон траектории N также является постоянным и характеризует объем запасов пласта без учета коэффициента извлечения [7].

Другие зависимости показывают, что падение давления компенсируется за счет других источников: подпор водоносного пласта или повышенное уплотнение частиц коллектора или комбинация этих факторов.

Так в случае зависимости С присутствует энергия подпора условно бесконечного (по сравнению с объемами нефти) водоносного горизонта, где градиент снижения пластового давления все еще не достиг границы водоносного пласта. Кривая В иллюстрирует ситуацию,

где подпор также происходит за счет расширения водоносного горизонта, однако в этом случае такой подпор нельзя назвать бесконечным, так как градиент снижения пластового давления уже достиг границы водораздела. Здесь важно отметить, что обратная экстраполяция кривых В и С также дает значение объема нефти в резервуаре.

Применение уравнения материального баланса для газовых месторождений

Главной задачей метода применения уравнения материального баланса для газовых месторождений является оценка вовлеченности запасов газа. В исследованиях [8] говорится о недостатках применения такого метода оценки без учета механизма вытеснения газа за счет подпирающего водоносного горизонта. На рисунке 4 представлены различные значения объемов газа в месторождении, которые могут быть получены от линейной экстраполяции данных, полученных при тестовой добыче газа. Так оценка извлекаемых запасов газа в режиме получения энергии вытеснения за счет расширения газа может привести к недооценке объемов газа в пласте, в то время как пренебрежение подпором водоносного горизонта может привести к значительной переоценке газа в месторождении.

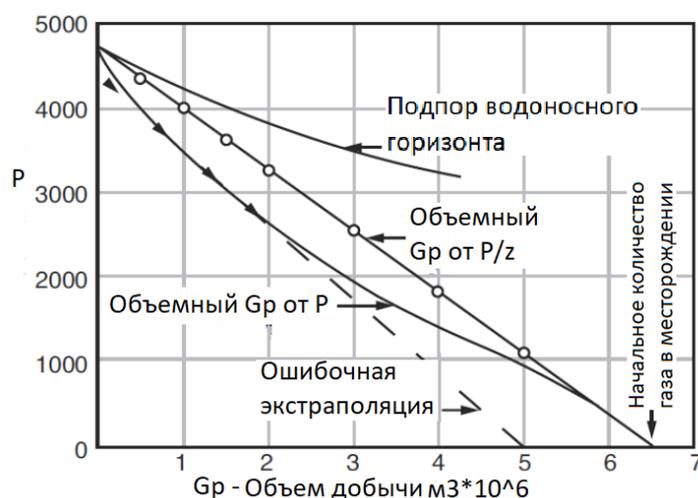


Рисунок 4. Сравнение уровня добычи газа от давления и P/z для объемного типа резервуаров и резервуаров с подпором водоносного горизонта (составлено авторами)

В связи с тем, что в газовом месторождении давление из-за явления диффузии внутри резервуара распределяется более однородно чем в нефтяном месторождении, уравнение материального баланса может быть только частично применено для оценки извлекаемых запасов. Вязкость газа намного ниже вязкости нефти, в следствие чего коэффициент диффузии в газовом месторождении порядка пяти раз больше, чем в месторождении нефти. По этой причине, потеря давления на прилегающем к скважине участке быстро компенсируется и выравнивается вдоль всего резервуара за счет расширения газа, что сводит к минимуму другие механизмы вытеснения и позволяет пренебречь их влиянием в процессе анализа.

Использование подхода описанного в [9] к газовым резервуарам обеспечивает возможность сопоставления истории добычи и получения хорошей оценки объемов газа в месторождении для сравнения с предыдущими расчетами. Кроме того, подход позволяет определить тип механизма вытеснения резервуара, то есть является ли он резервуаром объемного типа, где вытеснение происходит за счет расширения газа, или в нем есть подпор водоносного горизонта, также участвующий в замещении уходящего на поверхность газа. Применение этого подхода предусматривает следующую интерпретацию уравнения материального баланса.

Добыча жидкости = Расширение газа + расширение воды + уплотнение пор + приток воды.

$$F = G (E_g + E_{fw}) + W_e \quad (10)$$

В случае газового месторождения расширением воды и уплотнением пор можно пренебречь за счет высокой сжимаемости газа. В таком случае уравнение примет следующий вид.

$$F = GE_g + W_e \quad (11)$$

Разделив обе части этого уравнения на E_g получим:

$$\frac{F}{E_g} = G + \frac{W_e}{E_g} \quad (12)$$

Такая форма уравнения становится удобной для анализа объемов добычи газа (рисунок 5).

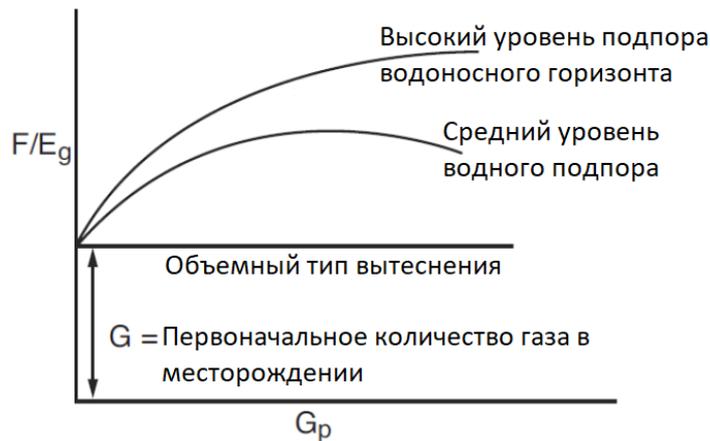


Рисунок 5. Графическое представление уравнения материального баланса для оценки запасов газа и определения механизма вытеснения (составлено авторами)

Три графика на рисунке 5 показывают, что при наличии подпора давления водоносного горизонта кривые отклоняются от горизонтальной линии, которая применима к резервуарам с объемным типом вытеснения. Кроме того, график позволяет определить объем первоначальных запасов газа в месторождении. Это также может стать полезным инструментом при разработке газового месторождения, так как может позволить обнаружить наличие подпора водоносного горизонта до начала добычи воды через газовые скважины. Надвигающийся фронт воды зачастую проявляется только тогда, когда контакт газ-вода достигает нижнего предела газодобывающих скважин, которые, как стоит отметить, устанавливаются в верхних частях структуры.

Другим важным при разработке газового месторождения фактором является мобильность вытесняющей воды:

$$M = \frac{k'_{rw}}{\mu_w} / \frac{k'_{rg}}{\mu_g} \quad (13)$$

Для воды значение мобильности может быть даже ниже 0,01, в то время как для газа значение этого параметра может быть в 100 раз больше. Это означает, что газ внутри пласта движется в 100 раз быстрее воды. Таким образом становится очевидно, что по мере

продвижения уровня грунтовых вод, он будет удерживать газ в виде остаточного газонасыщения. Кроме того, чем выше давление в резервуаре, тем большее количество газа будет захвачено водным фронтом [10].

Заключение

В заключении важно отметить, что затронутые в работе концепции применимы преимущественно в качестве метода оценки запасов месторождения. Для прогнозирования дебитов скважин, а также объемов извлекаемых запасов сегодня более применимыми являются методы численного моделирования, которые не были затронуты в работе. Однако в заключении важным будет отметить, что показанные в работе методы применения численного анализа для уравнения материального баланса могут дать возможность получения новых результатов для линейной формы уравнений, таких как, например, поиск объема газовой шапки нефтяного месторождения с помощью перебора различных значений с необходимой степенью точности.

Сегодня несмотря на то, что метод материального баланса был известен и применяется инженерами и учеными давно в различных областях, находятся все новые направления его применения, как те, что описаны в настоящей работе. Кроме того, развитие современной вычислительной техники открывает перед исследователями новые возможности для использования графических инструментов для более полного понимания, процессов, описанных уравнениями материального баланса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dake, L.P. "The Practise of Reservoir Engineering" Elsevier, Ams 1994.
2. Абасов М.Т., Закиров С.Н. Влияние плотности сетки скважин на нефтеотдачу. Нефтяное хозяйство, № 9, 2005, стр. 90-92.
3. Кулиев А.М., Эфендиев Р.М., Казымов Б.З., Тагиева С.Э. Моделирование процесса разработки нефтяных месторождений при режиме растворенного газа с учетом релаксации горных пород, Изв. АН Азербайджана, сер. Науки о Земле, №2, 1998, стр. 21-25.
4. Engler, T.W.: "A New Approach to Gas Material Balance in Tight Gas Reservoirs", SPE # 62883, presented at the ATCE in Dallas, TX (2000).
5. Lee, J. and Wattenbarger, R.A.: Gas Reservoir Engineering, SPE Textbook Series, Vol 5, Richardson, TX 1996.
6. Fahd Siddiqui, Ghulam M. Waqas, M. Noma Petroleum Limited, Karachi-Pakistan – Application of General Material Balance on Gas Condensate Reservoirs GIIP Estimation – Conference Paper, November 2010.
7. Rahman, N.M.A., Anderson, D.M., and Mattar, L. 2006. New, Rigorous Material Balance Equation for Gas Flow in Compressible Formation. Paper SPE 100563 presented at the SPE Symposium on Gas Technology, Calgary, 15-17 May. doi: 10/2118/100563-MS.
8. Alaei, K.H., & Yazdizadeh, A. (2013). Neural network using Bayesian algorithm for estimation of petroleum reservoir. Petroleum Science and Technology, 42(7), 1044-1068.
9. Anyadiegwu, C.I.C. (2012). Estimation of storage capacity of an underground gas storage reservoir. International Journal of Academic Research, 4(4), 116-122.
10. Алтунин А.Е. Использование альтернативных и модифицированных вероятностных методов для оценки неопределенностей и рисков при подсчете запасов углеводородов / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин, О.А. Ядрышникова // Научно-технический Вестник ОАО «НК «РОСНЕФТЬ». 2013. № 3. С. 42-47.

Panassenko Natalia Leonidovna

Far eastern federal university, Vladivostok, Russia
E-mail: natasha--0@mail.ru

Anisimova Ekaterina Yurievna

Far eastern federal university, Vladivostok, Russia
E-mail: anisimova.eiu@mail.ru

Tsyrendashiev Nasag Batorovich

Far eastern federal university, Vladivostok, Russia
E-mail: nasag97@mail.ru

Tsybulya Irina Igorevna

Far eastern federal university, Vladivostok, Russia
E-mail: irinatsybulya0205@mail.ru

Yasnyuk Tatyana Igorevna

Far eastern federal university, Vladivostok, Russia
E-mail: tanya_yasnyuk@mail.ru

Vyazkova Elizaveta Andreevna

Far eastern federal university, Vladivostok, Russia
E-mail: vyazkova.elizaveta@yandex.ru

Application of the material balance equation in the exploration of oil and gas fields

Abstract. The article discusses issues related to the contradictions that arise when choosing a method for estimating reserves of a field, namely, comparing the advantages of methods for estimating reserves using the material balance equation and modern means of numerical simulation. The paper argues in favor of using a combination of these methods, where modern modeling tools are proposed to be used as an additional tool for clarifying and confirming data on the performance of individual wells, as well as creating a forecast of the level of recoverable reserves. At the same time, the method of applying the material balance equation is proposed as a basis for determining the total reserves in both oil and gas fields through the construction of graphical dependencies of the equation solution. In addition, the paper considers a method that allows analyzing the presence of one or another mechanism for displacing formation fluid in the area of a production well and thus assessing the suitability of a field for commercial exploitation. The paper discusses in detail the various combinations of mechanisms for displacing reservoir fluid in both oil and gas fields. An important focus of the work is the method of determining the presence in the reservoir of an active recharge of an aquifer, as well as an assessment of the degree of its activity, that is, the possibility and rate of replacement of formation fluid with aquifer water. The application of this method is considered in oil and gas reservoirs, where in addition to the designated replacement mechanism, other components of pressure compensation are clearly pronounced, such as the expansion of oil and gas dissolved in it, the expansion of the gas cap gas, and the expansion of gas in a gas field.

Keywords: material balance equation; reserves assessment; oil field; gas field; displacement mechanism; formation fluid; aquifer backwater