

УДК 532.5:622.276:622.276.43:622.276.64

Гидродинамическое моделирование эффекта рассоления терригенных коллекторов при заводнении пресной водой

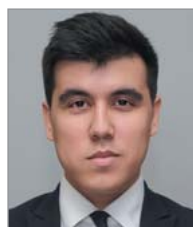
Hydro-dynamic Modeling of Terrigenous Reservoir Desalting Effect in Cases with Fresh Water-flooding



Р.Р. Шакиров



Н.Н. Шелест



С.Б. Комалов



И.М. Сафьянников



А.Р. Розова

Р.Р. Шакиров
Shakirov.RR@gazprom-neft.ru
/ООО «Газпромнефть-ГЕО»,
г. Санкт-Петербург/

Н.Н. Шелест
Shelest.NN@gazpromneft-ntc.ru

С.Б. Комалов
Komalov.SB@gazpromneft-ntc.ru
/ООО «Газпромнефть НТЦ»,
г. Санкт-Петербург/

И.М. Сафьянников
А.Р. Розова
/Компания «Шлюмберже», г. Москва/

R.R. Shakirov /"Gazpromneft-GEO" LLC,
St. Petersburg/
N.N. Shelest, S.B. Komalov
/"Gazpromneft NTC",
St. Petersburg/
I.M. Safyannikov, A.R. Rozova
/«Schlumberger», Moscow/

Месторождения Восточной Сибири характеризуются высокоминерализованным составом пластовых вод и неравномерным засолонением порового пространства коллектора. В данной работе проведена оценка процессов, возникающих при закачке пресной воды в пласт с засолоненным коллектором, путем воспроизведения результатов лабораторных экспериментов на керне и секторного моделирования элементов разработки. Рассмотрена возможность перехода от сложного и затратного композиционного моделирования E300 к расчетам на симуляторе E100 за счет модификации ОФП.

Ключевые слова: рассоление коллектора, высокоминерализованная пластовая вода, изменения порового пространства в результате рассоления, композиционное моделирование, вытеснение нефти, ECLIPSE* 300, ECLIPSE 100.

The fields in Eastern Siberian are characterized by high-mineralized composition of formation water and uneven salinity inside the reservoir porous space. In this paper the authors present the evaluation of processes that appear with the injection of fresh water into the formation with saline reservoir through the reproduction of lab test results with core and sectoral modeling of development objects. The authors also consider the possibility in shifting from E300 complicated and costly compositional modeling to the calculations at E100 simulator through the optimization of relative phase permeability.

Key words: reservoir desalting, high-mineralized formation water, change in porous space as a result of desalting, compositional modeling, oil displacement, ECLIPSE 300, ECLIPSE 100.

Докембрийские пласты восточносибирских месторождений характеризуются неравномерным засолонением порового пространства коллектора и высокоминерализованными пластовыми водами. При проектировании и моделировании системы заводнения для подобных пластов необходимо учитывать эффекты от вымывания солей и постепенного увеличения порового пространства.

При выборе агента закачки следует оценить возможные проблемы при организации заводнения:

■ трудность подбора воды с вышележащих объектов, совместимой с высокоминерализованной пластовой водой и нефтью разрабатываемого объекта, так как смешение вод с различным катионно-ионным составом приводит к выпадению нерастворимых солей и значительному ухудшению приемистости нагнетательных скважин;

* Марка Шлюмберже.

- недостаток попутной воды для реализации системы ППД и экономическая нецелесообразность бурения дополнительного фонда водозаборных скважин;

- изменение фильтрационно-емкостных свойств коллектора в процессе растворения галитов при нагнетании поверхностной пресной воды.

При заводнении пресной водой вымывание соли из низкопроницаемого порового пространства может иметь как положительный, так и отрицательный эффект. В данной статье приведен опыт численного моделирования прогнозных показателей с учетом изменения ФЕС в процессе рассоления.

НАСТРОЙКА ПРОЦЕССА РАССОЛЕНИЯ НА ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВЫМЫВАНИЮ СОЛЕЙ

Моделирование процесса рассоления коллектора не является стандартной опцией ECLIPSE-300, данный эффект может быть описан с помощью моделирования твердой фазы, многокомпонентной воды и химических реакций.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ

Как показали проведенные эксперименты по рассолению керна, растворению подвергается в среднем только 30 % соли, которая заполняет высокопроницаемые каналы. Поэтому объем соли, принятый в геологической модели, в ГДМ разделен на растворимую и нерастворимую части (рис. 1).

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ВОДЫ

По результатам экспериментов вымываемая соль представлена в основном галитом (хлоридом натрия). В ГДМ заданы три компонента: пресная вода, пластовая вода и насыщенный раствор соли. После растворения галита пресная нагнетаемая вода описывается новым компонентом – это насыщенный раствор хлорида натрия. Изменение минерализации нагнетаемой

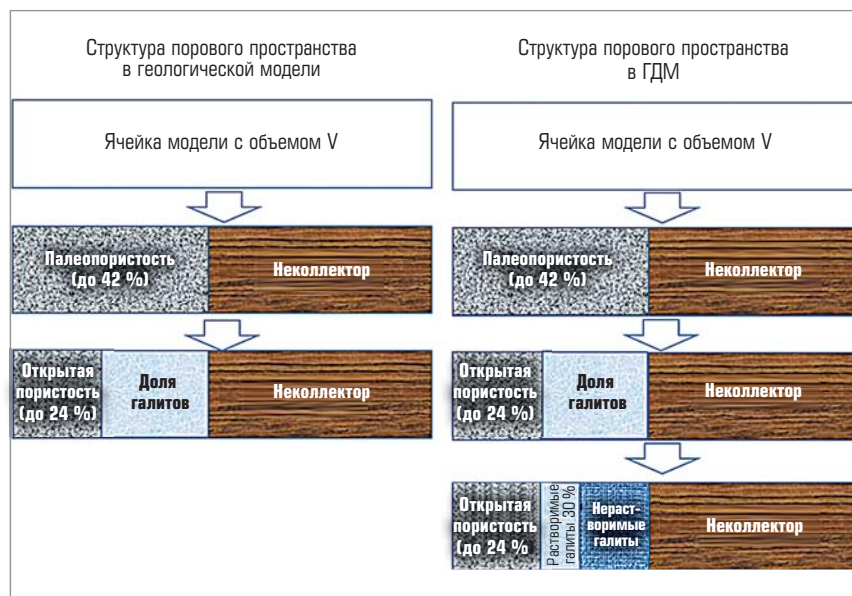


Рис. 1. Сопоставление подходов к моделированию порового пространства в ГМ и ГДМ

воды моделируется дискретно, т.е. она может быть только в двух состояниях: пресная и в виде насыщенного рассола.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Процесс растворения соли в воде не является химической реакцией, т.к. в результате данного процесса новые вещества не образуются. Раствор соли представляет собой смесь твердого (соль) и жидкого (вода) веществ, образующих одну жидкую фазу – раствор соли. Схематически растворение соли может быть описано следующим образом:

молекула соли + 8,909 «молекул» пресной воды -> 8,909 «молекул» раствора соли.

Приведенная схема пригодна для моделирования изменения объема, занимаемого водой и солью после растворения последней с учетом выполнения закона сохранения массы. Таким образом, описанный подход позволяет физически обоснованно моделировать:

- объемы растворения соли, соответствующие объемам пресной воды, пришедшей в ячейку модели;
- изменение порового объема ячейки при растворении соли.

ИЗМЕНЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ ФЛЮИДА В ЯЧЕЙКЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ЗАСОЛЕНИЯ

Средства ECLIPSE позволяют динамически модифицировать подвижность флюида в ячейке в зависимости от насыщения солью. Изначально в модель подается куб проницаемости с максимальными значениями без учета соли. Затем в процессе инициализации модели куб проницаемости трансформируется путем умножения на коэффициенты, зависящие от начального содержания соли в ячейках.

Для обоснования зависимости, описывающей изменение проницаемости в процессе рассоления, и подбора параметров реакции растворения было проведено композиционное моделирование (E-300) экспериментов по рассолению керна.

НАСТРОЙКА ПРОЦЕССА РАССОЛЕНИЯ НА ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВЫМЫВАНИЮ СОЛЕЙ

Для воспроизведения одного из экспериментов построена линейная модель 5*1*1 с размерами ячейки 1*3*3 см, заданы фактические значения пористости, проницаемости, доли галита, порового объема.

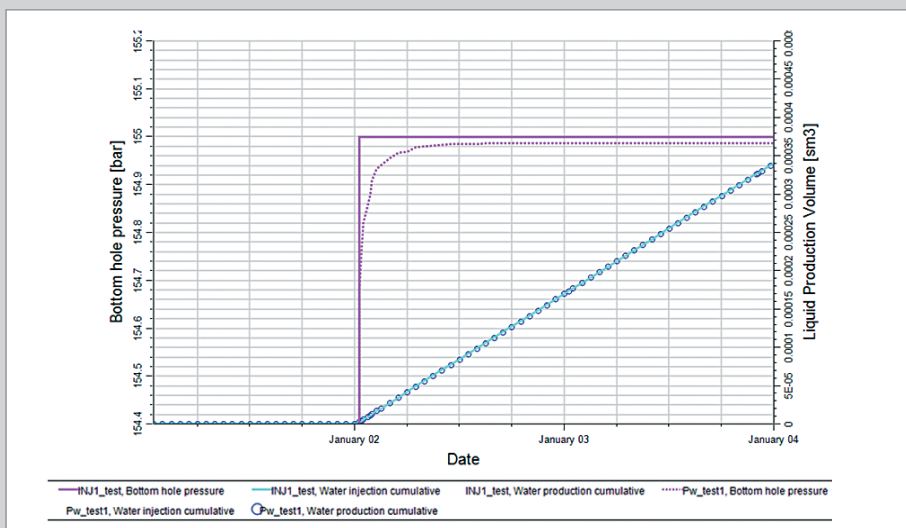
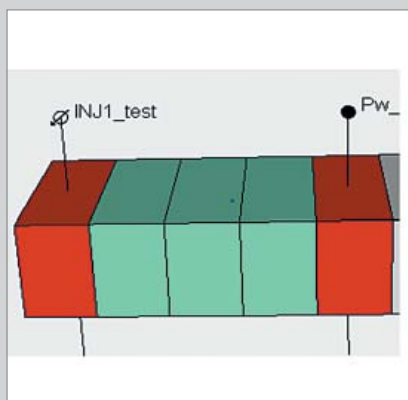


Рис. 2. Динамика накопленной добычи, закачки воды и забойных давлений в процессе проведения опыта 1 в системе «пресная вода – пластовая вода»

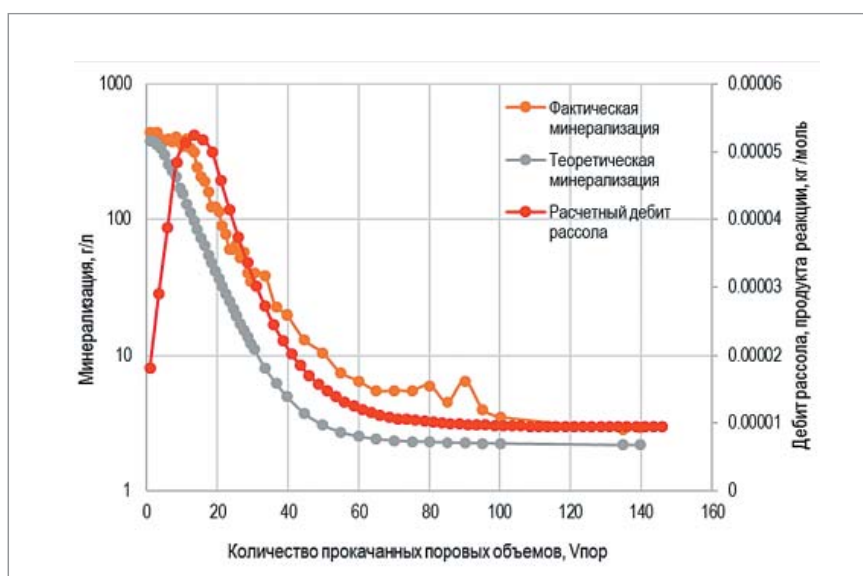


Рис. 3. Сопоставление фактической и расчетной динамики вымывания соли при моделировании опыта 1

В модели задаются три типа воды: пресная, рассол (продукт реакции рассоления) и пластовая вода.

Для воспроизведения эксперимента в модели прежде всего необходимо подобрать режимы отбора и закачки таким образом, чтобы за время эксперимента было отобрано фактическое количество поровых объемов закачиваемой воды (рис. 2).

Затем воспроизводится процесс рассоления. Подбор скорости реакции осуществляется итерационным путем для повторения фактической динамики снижения количества

соли в отбираемой воде в зависимости от объема прокачки (рис. 3).

Исходя из сравнения расчетной и фактической динамики рассоления следует отметить удовлетворительную сходимость с данными эксперимента; в модели появляется продукт реакции (рассол) и наблюдается снижение его концентрации в связи с вымыванием соли.

Следующим шагом по настройке модели является моделирование изменения порового пространства в результате рассоления. В ходе эксперимента при неизменной скорости закачки зафиксировано резкое

уменьшение перепада давления, обусловленное увеличением ФЕС породы вследствие растворения галита, входящего в структуру поровых каналов образца. В результате нескольких итераций удалось подобрать зависимость проницаемости от засолоненности (рис. 4), которая соответствует ядерным данным и позволяет повторить фактическую динамику изменения депрессии, обусловленную увеличением порового пространства (рис. 5).

Таким образом, в результате моделирования удается настроить скорость реакции и подобрать зависимость изменения проницаемости от насыщения солью.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УЧЕТА РАССОЛЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАЗРАБОТКИ

Сопоставление результатов прогнозных расчетов с учетом рассоления и без него (рис. 6) позволяет сделать вывод о том, что за счет вымывания солей значительно изменяются объемы закачиваемой воды, влияющие на динамику добычи нефти и обводненности продукции. Явно положительный эффект отмечается в первые 4–5 лет разработки: прирост добычи нефти составляет 20–25 %.

В последующем за счет формирования высокопроницаемых каналов происходит опережающий

прорыв воды, которая приходит в 2–3 раза быстрее из-за размывания солей.

СЕКТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПЕРЕХОД ОТ КОМПОЗИЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ E300 К E100

Композиционное моделирование при адаптации секторной модели и проведение прогнозных расчетов занимают большое количество времени, в связи с чем необходимо перейти к симулятору E100 и учесть эффект рассоления путем модификации ОФП.

В процессе многовариантного моделирования на секторной модели, представляющей собой только чисто нефтяную зону, была выполнена оценка изменения профилей добычи и обводненности в зависимости от закачиваемого агента (пластовой или пресной воды). Разница в подвижности агентов закачки и эффект от рассоления учитывались модификацией ОФП по воде.

Моделирование закачки пластовой воды и использование модифицированных ОФП позволили повторить динамику показателей, полученную ранее при закачке пресной воды (рис. 7).

Ниже приведено сопоставление основных прогнозных показателей (рис. 8).

Таким образом, эффект рассоления коллектора при заводнении пресной водой был воспроизведен как с помощью увеличения пористости и проницаемости пласта, химических реакций, изменения свойств фильтруемой воды при композиционном моделировании, так и за счет модифицированных фазовых проницаемостей, которые позволили перейти от громоздких расчетов в композиционном симуляторе ECLIPSE-300 к расчетам в E-100.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведена оценка процессов, протекающих при закачке пресной воды в пласт с засоленным коллектором. Описанный подход заключается в постепенном переходе от ядерных моделей к полноразмерным.

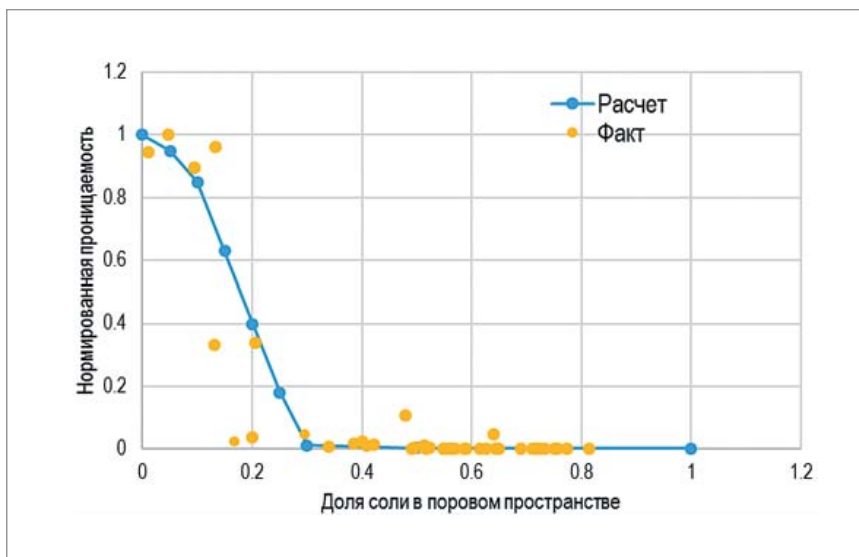


Рис. 4. Зависимость проницаемости от насыщения солью

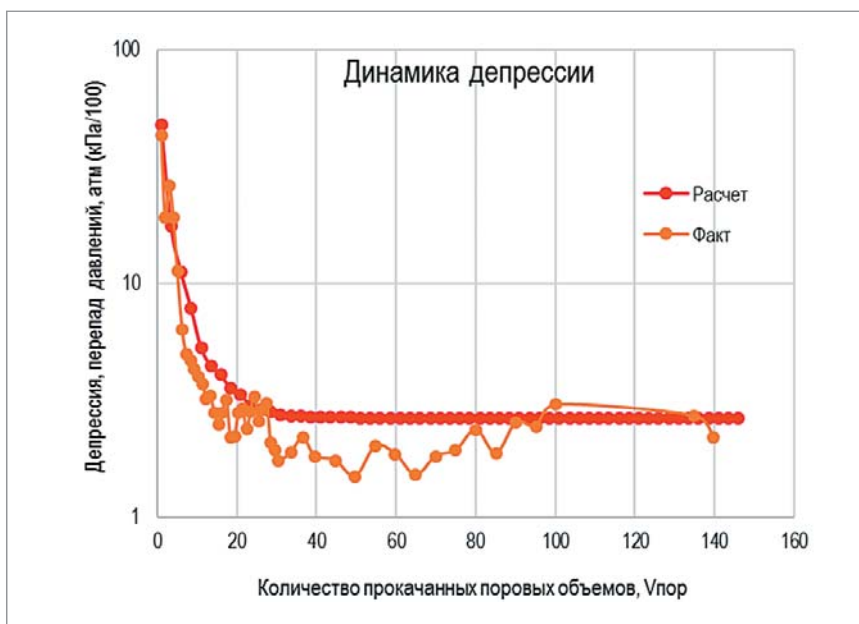


Рис. 5. Сравнение динамики перепада давления в процессе проведения опыта 1 в системе «пресная вода – пластовая вода» с воспроизведенной депрессией при моделировании

Расчеты опираются на результаты лабораторных экспериментов на керне, а такие характеристики и параметры рассоления, как скорость реакции и зависимость изменения проницаемости от снижения доли засолонения, получены при численном воспроизведении этих экспериментов.

На основе расчетов сделан однозначный вывод о необходимости учитывать при полномасштабном моделировании процессы, проте-

кающие при рассолении. Учет эффекта рассоления значительно изменяет динамику добычи нефти и обводненности продукции. Явный положительный эффект от закачки пресной воды просматривается в первые 4–5 лет разработки (увеличение уровня добычи на 20–25 %). В последующем происходит опережающий прорыв воды, которая приходит в 2–3 раза быстрее благодаря улучшению ФЕС при размывании солей.

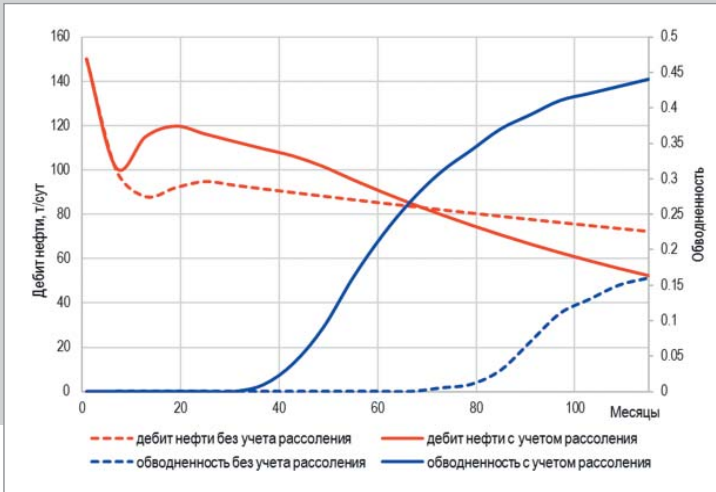


Рис. 6. Сопоставление динамики показателей разработки с учетом и без учета процесса расслоения

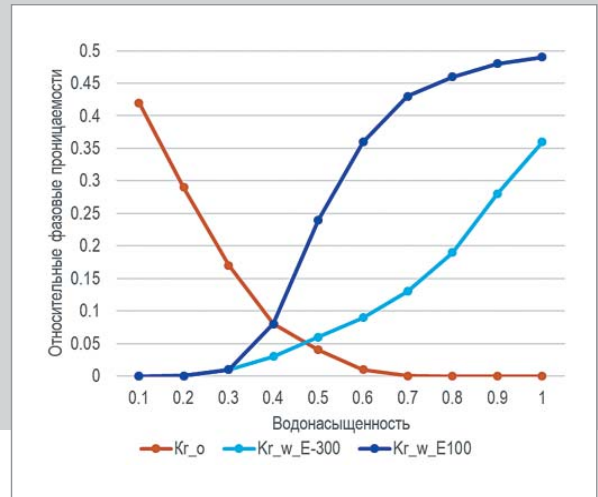


Рис. 7. Сопоставление исходных ОФП для E-100 и модифицированных ОФП для E-300

Рассмотрена возможность перехода от сложного и затратного композиционного моделирования E300 к расчетам на симуляторе E100 за счет модификации относительной фазовой проницаемости по воде. Данный переход способствует существенному сокращению времени расчетов (с 14 суток до 4 часов), что позволяет просчитать множественные сценарии для определения оптимальных вариантов разработки.

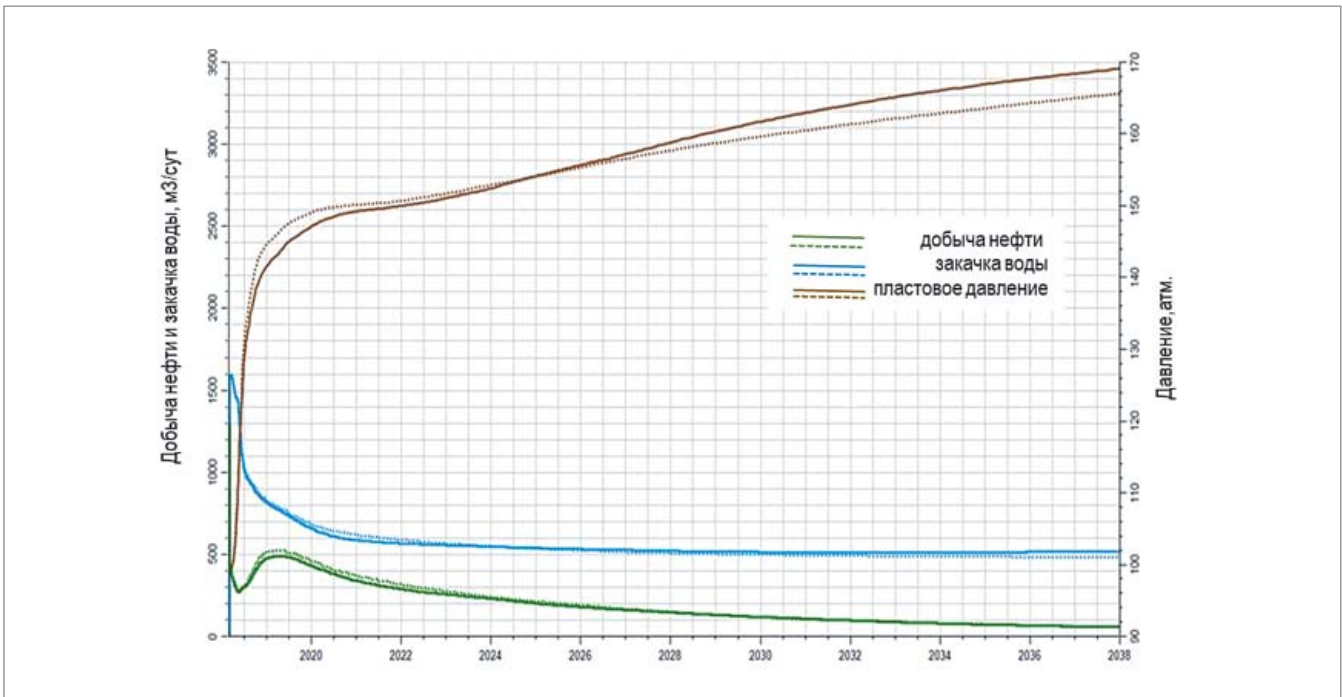


Рис. 8. Сравнение основных показателей по вариантам с использованием композиционного моделирования (E-300) и модифицированных ОФП (E-100)

Литература

1. ECLIPSE Technical Description.
2. ECLIPSE Reference Manual.
3. Evolution of Approaches to Oil Rims Development in Terrigenous Formations of Eastern Siberia. 187772-MS SPE Conference Paper – 2017.
4. Challenges in the Development of Saline Terrigenous Reservoirs of Eastern Siberia Field. 191570-18RPTC-MS SPE Conference Paper – 2018.

5. Отчет «Комбинированный проект разведки (доразведки) месторождений нефти, газа и поисков новых залежей углеводородов в пределах Тымпучиканского, Вакунайского и Игнялинского лицензионных участков», ООО «Газпромнефть-Ангара». Отв. исп. Штайн А.Г. – Тюмень, 2014.
6. Петрофизическое моделирование свойств терригенных коллекторов Чонской группы месторождений. Создание методики интерпретации ГИС. ООО «Газпромнефть НТЦ». – Санкт-Петербург, 2016.