

Численная реализация механизма термогазового воздействия на двумерной модели

А.М. Шахмаев

аспирант¹

89artur.shakhmaev@gmail.com

Я.О. Симаков

заместитель начальника по моделированию

департамента разработки месторождений²

yaroslav.s.olegovich@gmail.com

П.В. Пятибратов

к.т.н., доцент кафедры разработки и

эксплуатации нефтяных месторождений¹

pyatibratov.p@gmail.com

А.А. Мосесян

инженер кафедры бурения нефтяных и газовых

скважин¹

mosesyana@gmail.com

¹РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина,

г. Москва, Россия

²ООО «Петек», г. Москва, Россия

В настоящее время на большинстве месторождений России добыча нефти из пластов с традиционными запасами снижается, и, несмотря на имеющиеся тенденции развития альтернативных источников энергии, потребление углеводородных ресурсов, согласно различным опубликованным материалам, только будет расти [1]. Одним из источников нетрадиционных запасов углеводородов являются пласты баженовской свиты. По оценке разных экспертов ее ресурсы оцениваются примерно в 100 млрд тонн. Эта оценка не включает углеводородный ресурс керогена (несформировавшейся нефти), содержащийся в баженовской свите.

Данная статья представляет описание на двумерной модели технологии моделирования термогазового воздействия (далее — ТГВ) на пласты баженовской свиты, с учетом особенностей последней и допущений, связанных с ограничениями симулятора.

Для прогнозирования технологических показателей и мониторинга процесса разработки месторождений углеводородов успешно применяется трехмерное гидродинамическое моделирование.

Стоит отметить, что термогазовое воздействие является перспективным методом вовлечения в разработку углеводородного потенциала керогена, который позволяет использовать преимущества известных методов увеличения нефтеотдачи (далее — МУН). Прогнозный КИН для ТГВ достигает 40% [2, 3].

Пласты баженовской свиты обладают высоким энергетическим потенциалом. Начальные пластовые условия являются благоприятными для инициации внутрпластовых окислительных процессов [4]. Повсеместное наличие керогена в скелете породы позволяет, при дальнейшем развитии процесса, получить высокотемпературный пиролиз с образованием тяжелого остатка (кокса), который создаст благоприятные условия для развития высокотемпературного фронта горения [5, 6].

Рассмотрим основные особенности баженовской свиты, накладывающие отпечаток на моделирование ТГВ:

- большая доля глинистых и керогенглинистых, практически непроницаемых толщ, формирующих недренлируемую зону («матрицу») — отношение по толщине к дренируемой зоне в среднем 4:1;
- наличие нефтегенерационного материала (керогена), распределенного по всему объему дренируемой и недренлируемой зон;
- наличие пустотного пространства матрицы, занятого жидкими углеводородами (далее — УВ), запертными в непроницаемых породах (общие запасы жидких УВ могут в 2–3 раза превышать запасы дренируемой зоны).

Рис. 1 показывает основные зоны, формирующиеся при реализации ТГВ.

Авторы полагают, что при численной реализации ТГВ необходим учет следующих физических явлений, часть из которых характерна для пород баженовской свиты. А именно:

- процесс термодеструкции керогена при температурах свыше 300–350 °С, приводящий к выходу жидкой фазы (так называемая «синтетическая» нефть), попутного газа и тяжелого остатка (кокса);
- горение кокса — как основной источник энергии, генерирующийся в пласте;
- процесс жидкофазного окисления тяжелых компонентов нефти и керогена;
- изменение фильтрационно-емкостных свойств (далее — ФЕС) коллектора при разложении керогена и последующем сгорании твердого остатка (кокса), с последующим увеличением пустотного пространства, занятого флюидами;
- изменение ФЕС коллектора в процессе теплового воздействия и изменение давления (растрескивание породы при нагреве, проявление упругих сил, геомеханические эффекты, характерные для упругого и упруго-пластичного сжатия/расширения). К этим процессам, в том числе, относится вовлечение матрицы в разработку за счет охвата температурным воздействием ее приграничных областей и последующего частичного раскрытия микротрещин, образовавшихся в процессе нефтегенерации и пребывающих в настоящее время в «запечатанном» состоянии.

Перед построением полномасштабных моделей опытно-промышленных участков или целых месторождений, авторы поэтапно описали численную реализацию термогазового воздействия на линейной модели.

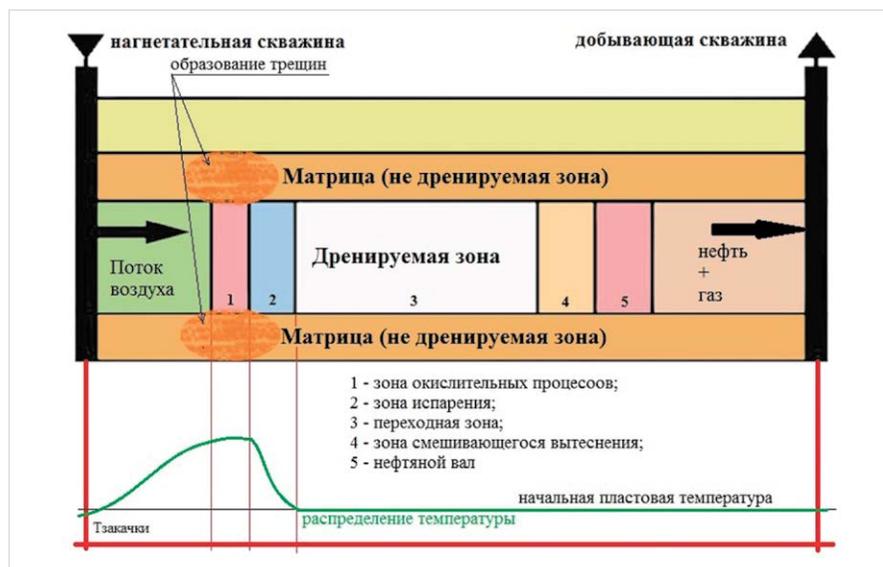


Рис. 1 — Общий вид зон при реализации ТГВ
Fig. 1 — General view of zones of TGT

Материалы и методы

На сегодняшний момент рассматриваются следующие методы: разработка баженовской свиты на естественном режиме; гидроразрыв пласта; сода-ПАВ-полимерное воздействие на пласт (ASP-заводнение); ТГВ. ТГВ является наиболее перспективным, с технологической точки зрения, способом разработки. В то же время ТГВ — сложный физико-химический процесс, который требует реализации на гидродинамической модели для оценки технологических показателей. Для проведения данных работ выбран гидродинамический симулятор CMG STARS, который позволяет моделировать тепловые и газовые методы увеличения нефтеотдачи и считается одним из лучших симуляторов в этой области.

Ключевые слова

баженовская свита, термогазовое воздействие, дренируемые и недренируемые пласты, кероген, кокс, внутрипластовое горение, моделирование, 2D модель, методы увеличения нефтеотдачи

Моделирование процесса ТГВ реализовано на симуляторе CMG STARS, так как он является наиболее функциональным и используемым в мире инструментом для моделирования тепловых МУН. Отработка технологии и учет вышеописанных особенностей подразумевает получение качественного результата, то есть численное воспроизведение основных физико-химических процессов, протекающих при реализации ТГВ в условиях баженовской свиты на симуляторе.

Поэтапная реализация математического описания процесса ТГВ

Перед тем, как перейти непосредственно к численной реализации ТГВ, необходимо решить вопросы, касающиеся следующих физико-химических особенностей пород баженовской свиты:

- формализации подходов к определению параметров, характеризующих пустотное пространство пород баженовской свиты и насыщающих его веществ (пустотность, трещиноватость, свободная нефть, Total Organic Carbon — степень насыщения органикой нефтематеринских пород и т. д.);
- изменения ФЕС первоначально непроницаемой микротрещиноватой матрицы при воздействии на нее процессов термической обработки с сопутствующим изменением пластового давления.

Далее процесс ТГВ на породы баженовской свиты можно условно разделить на несколько составляющих:

1. Эффективное извлечение легкой нефти из дренируемых зон (в том числе, за счет реализации процесса смешивающегося вытеснения впереди фронта горения).
2. Вовлечение в разработку нефтекерогенсодержащих зон пласта за счет тепловой обработки с последующим пиролизом и высвобождением более легких жидких и газообразных УВ.
3. Вовлечение в разработку первоначально недренируемых толщ матрицы, которые, как упоминалось выше, содержат большие запасы легкой нефти и керогена.

В работе [7] приведено описание основных особенностей применения термогазового воздействия на баженовскую свиту и отмечено, что компьютерное моделирование подтвердило перспективность

применения ТГВ и целесообразность его развития.

В работах [8–14] достаточно подробно описаны математические подходы к численной реализации вышеперечисленных пунктов. Однако, особенную трудность у авторов вызывала задача вовлечения в процесс дренирования непроницаемых толщ матрицы. В работах [7–12] авторы не описывали достаточно подробно реализацию данного эффекта, сконцентрировав свои работы на исследовании других, не менее важных процессов ТГВ. В работе [13] был предложен коэффициент для учета добычи нефти из недренируемой зоны.

В работе [14] процесс ТГВ реализован с помощью гидродинамического симулятора CMG STARS и внешней среды для программирования, которая и учитывает эффект вовлечения матрицы в процесс разработки. Отличительная особенность данной работы заключается в том, что механизм ТГВ численно реализован полностью в рамках одного гидродинамического симулятора. В статье описаны возможности CMG STARS по учету изменения ФЕС от изменения термобарических условий в недренируемой зоне, и сделан наиболее оптимальный выбор с точки зрения времени счета и воспроизведения эффекта. Стоит сразу же сказать, что успешная реализация данной задачи должна обеспечить важнейшую составляющую эффекта от ТГВ в условиях баженовской свиты.

Эффект вовлечения недренируемой зоны связан с тем, что запасы свободной нефти литотипов матрицы (микротрещиноватой породы) существенно превышают аналогичные запасы дренируемой зоны (по отдельным оценкам, более чем в 2 раза). Запасы керогена, связанные с глинистыми породами матрицы, такжекратно больше и достигают 40% от объема породы (при 4–10 % в карбонатах дренируемой зоны) [14].

В выше упомянутых работах приводятся результаты лабораторных исследований, которые показывают существенное изменение ФЕС как микро-, так и макротрещиноватой породы под воздействием температуры. Все эти данные свидетельствуют о практической необходимости численной реализации процесса для последующей более обоснованной оценки эффекта ТГВ.

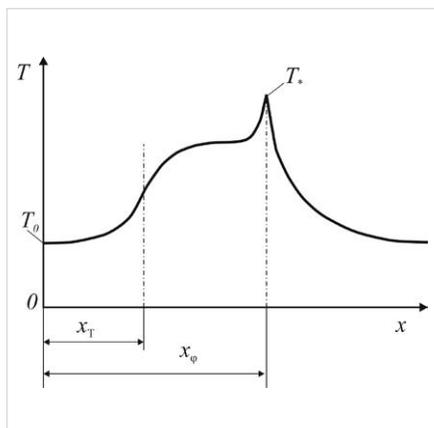


Рис. 2 — Кривая изменения температуры при сухом внутрипластовом горении для прямолинейного пласта [15]

Fig. 2 — Curve of temperature change during dry in-situ combustion for straight-line formation [15]

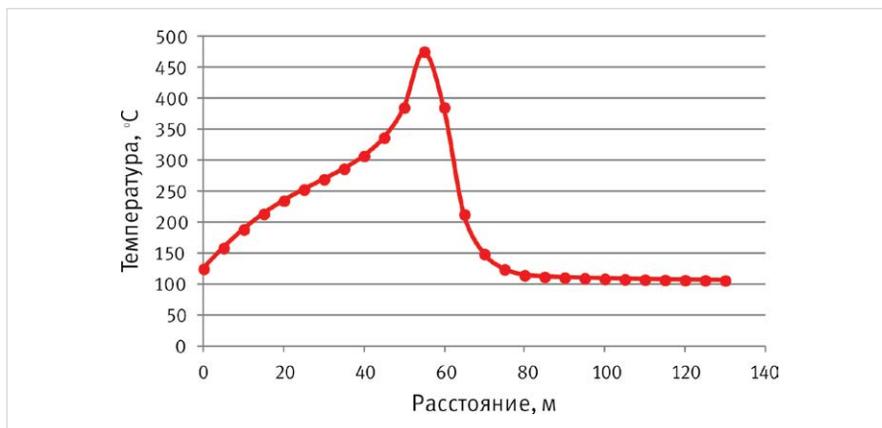


Рис. 3 — Кривая изменения температуры при внутрипластовом горении, полученная на двумерной модели

Fig. 3 — 2D interbedding in-situ combustion temperature curve

Размерность	Количество ячеек	Размеры ячейки	Начальная пористость		Нефтенасыщенность
			Матрица	Дренируемая зона	
500x1x5	2500	1x1x1	0,09	0,062	0,85

Таб. 1 — Основные параметры размерности линейной модели
Tab. 1 — Basic 2D dimension parameters

ДРЕНИРУЕМАЯ ЗОНА			МАТРИЦА		
КЕРОГЕН	Жидкие УВ	Сумма (потенциал)	КЕРОГЕН	Жидкие УВ	Сумма (потенциал)
0,097 (доли ед.)	0,062	0,159	0,115 (доли ед.)	0,09	0,205
116,4 (кг/м ³)			200 (кг/м ³)		
1830 (г/моль/м ³)			1685 (г/моль/м ³)		

Таб. 2 — Средние параметры пустотности, использовавшиеся в линейной модели
Tab. 2 — Average 2D model voids parameters

Показатель	Горные породы			Пластовые жидкости	
	Коллектор	Окружающие породы	Кероген	Нефть	Вода
Коэффициент теплопроводности, Дж/м·сут·°С	1,8·10 ⁵	1,8·10 ⁵	1,0·10 ⁵	1,15·10 ⁴	5,35·10 ⁴
Объемная теплоемкость, Дж/м ³ ·°С	2,3·10 ⁶	2,3·10 ⁶	-	-	-

Таб. 3 — Теплофизические свойства пластовых жидкостей и породы коллектора
Tab. 3 — Thermal properties of the fluids and reservoir rock

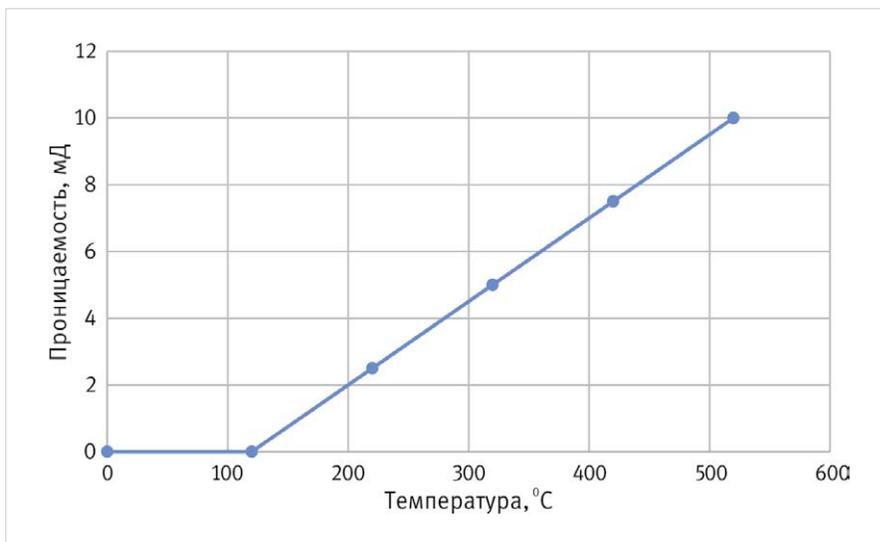


Рис. 4 — Зависимость проницаемости от температуры, в недренируемой зоне
Fig. 4 — Permeability versus temperature in the non-drainable zone

Формула компонента	Реакция	Энтальпия реакции, Дж/моль	Энергия активации, Дж/моль	Константа Аррениуса, 1/(сутки*кПа)
Низкотемпературное окисление				
C ₁₈₊	C ₁₈₊ + O ₂ → H ₂ O + CO ₂	1,2·10 ⁷	100 000	2·10 ⁸
C ₅ C ₇	C ₅ C ₇ + O ₂ → H ₂ O + CO ₂	1,2·10 ⁷	100 000	2·10 ⁸
Термолиз (постоянная скорость реакции вне зависимости от температуры)				
Kerogen	Kerogen → C ₂ -C ₄ + Synt_Oil + Coke	-	36 000	100
Высокотемпературное окисление				
Coke	Coke + O ₂ → H ₂ O + CO ₂	9,0·10 ⁷	21 000	10,0
Kerogen	Kerogen + O ₂ → H ₂ O + CO ₂	9,0·10 ⁷	21 700	10,0

Таб. 4 — Базовые уравнения и основные параметры химических реакций
Tab. 4 — Basic equations and basic parameters of chemical reactions

На первом этапе исследования была создана двумерная модель по разрезу «нагнетательная скважина — добывающая скважина», без матрицы, но с учетом теплопотерь для изучения и численного воспроизведения основных процессов, происходящих в дренируемой зоне, связанных с внутрислоевым горением. Для соответствия реалиям в модель закладывались средние величины геологических параметров, рассчитанные в актуальной геологической модели. Геомеханические параметры, уравнения химических реакций и параметры кинетики соответствовали реальным, полученным в ходе лабораторных экспериментов на образцах керна баженовской свиты.

По результатам первого этапа работы была отработана методика численного моделирования внутрислоевого горения: выделены основные зоны, характеризующие процесс (рис. 2 и 3), доказана обоснованность использования симулятора для оценки показателей разработки месторождений УВ методом внутрислоевого горения.

Температура T_{*} — положение фронта горения с координатой X_φ. На этой кривой виден излом на расстоянии X_T от начала координат. Это связано с конвективным переносом тепла. Сечение пласта с приближенной координатой X = X_T называется фронтом конвекции. В процессе внутрислоевого горения фронты горения и конвекции с координатами X_φ и X_T перемещаются по ходу движения закачиваемых в пласт веществ [15].

На втором этапе в линейную модель была дополнительно введена первоначально непроницаемая толща, характеризующая матрицу (рис. 5). К решению проблемы привлекался встроенный в STARS геомеханический симулятор.

Моделирование матрицы

Основной целью вовлечения матрицы является увеличение КИН за счет дополнительного притока легкой нефти, «закупоренной» в матрице. Для начала необходимо решить задачу о динамическом изменении ФЕС, которое обеспечит вовлечение матричной толщи в процесс фильтрации. Кроме того, не стоит забывать о постоянном изменении ФЕС дренируемой зоны в результате колебания давления и температуры в процессе внутрислоевого горения. Учет всех этих эффектов имеет важное значение для более реальной оценки эффекта внутрислоевого горения на пласты баженовской свиты.

Перед проведением расчетов на линейной модели необходимо оценить возможности симулятора, а также выбрать оптимальный вариант их использования.

Основные параметры размерности модели представлены в таб. 1, параметры пустотности для дренируемой и недренируемой зон представлены в таб. 2, теплофизические параметры пласта и флюидов представлены в таб. 3.

Возможности STARS по динамическому изменению ФЕС. Выбор механизма

Существует несколько вариантов реализации в CMG STARS механизмов изменения ФЕС коллекторов:

- встроенная модель упругого расширения/сжатия, (Dilation/Recompaction);
- механизм разрыва глинистой перемычки;

- модель растрескивания породы Бартон–Бэндиса [16].

Перед тем как выбирать механизм динамического изменения ФЕС, необходимо четко сформулировать, какие эффекты, связанные с процессом ТГВ, приводят к подобным изменениям.

Изменение ФЕС матрицы и дренируемой зоны в процессе внутрислоевого горения может происходить за счет следующих факторов:

- повышения давления в пустотном пространстве матрицы в результате её нагрева, как проявление упругих сил флюида;
- растрескивания породы в результате прогрева породы матрицы за счет теплопередачи от пород дренируемой зоны;
- растрескивания породы матрицы и дренируемой зоны в результате резкого локального изменения давления, вызванного закачкой рабочего агента (воздуха или водовоздушной смеси);
- реакции пиролиза, преобразующей твердое вещество кероген и увеличивающее тем самым эффективное поровое пространство, занятое флюидами;
- сгорания топлива (твердого остатка при реакции пиролиза).

Каждый из этих механизмов приводит к изменению пористости, что, в свою очередь, приводит к изменению проницаемости. Кроме того, строго говоря, механизмы 1 и 2 представляют собой единое целое, а работу всех механизмов (1–5) необходимо рассматривать в комплексе.

Предварительно, необходимо отметить общие ограничения симулятора.

Ячейка, проинициализированная нулевой проницаемостью, не будет участвовать в процессе массопереноса, но будет проводить и аккумулировать тепло, т.е. изменение её первоначально нулевой проницаемости полностью исключено. Это касается всех методов, кроме механизма разрыва глинистой перемычки. Изменение проницаемости ячеек необратимо (кроме модели Бартон–Бэндиса)

Отсутствует возможность задания табличной функции зависимости проницаемости от давления и температуры. Только один из двух механизмов может применяться для каждого литотипа.

Данные ограничения, в совокупности с индивидуальными особенностями каждого из подходов, приводят к выбору в пользу механизма разрыва глинистой перемычки.

Механизм разрыва глинистой перемычки

Данный механизм, реализованный в симуляторе STARS, позволяет учесть одновременно эффекты давления и температуры, а также эффект от вовлечения непроницаемой матрицы от температуры — возникновение и динамическое изменение проницаемости при нагреве, и проявление упругих сил в результате нагрева матрицы. Тепловой эффект так или иначе может быть учтен во всех предлагаемых моделях (в модели Бартон–Бэндиса он учитывается через изменение свойств породы и напряжений от температуры), однако, как было сказано выше, в этих механизмах нулевая проницаемость автоматически исключает ячейки матрицы из моделирования течения флюидов. Попытка задания крайне низкой проницаемости приводит к существенной нестабильности численной схемы решения и замедлению счёта.

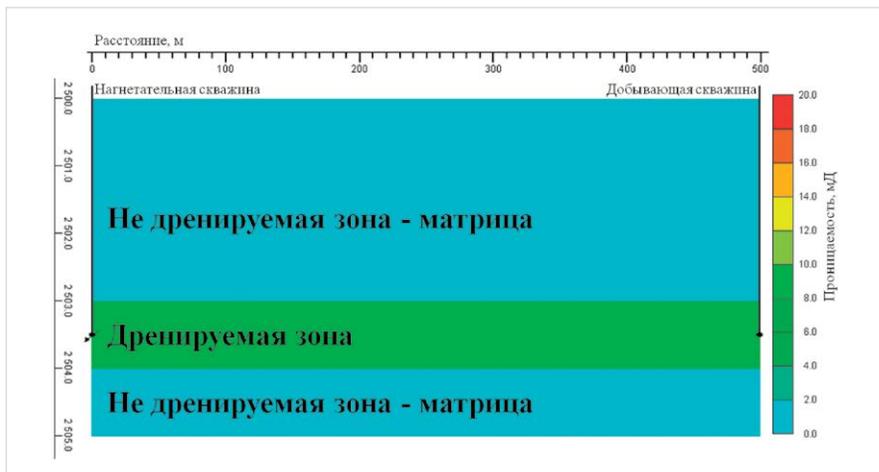


Рис. 5 — Начальное распределение проницаемости в двумерной модели с матрицей
Fig. 5 — Initial permeability distribution in the 2D model with a matrix

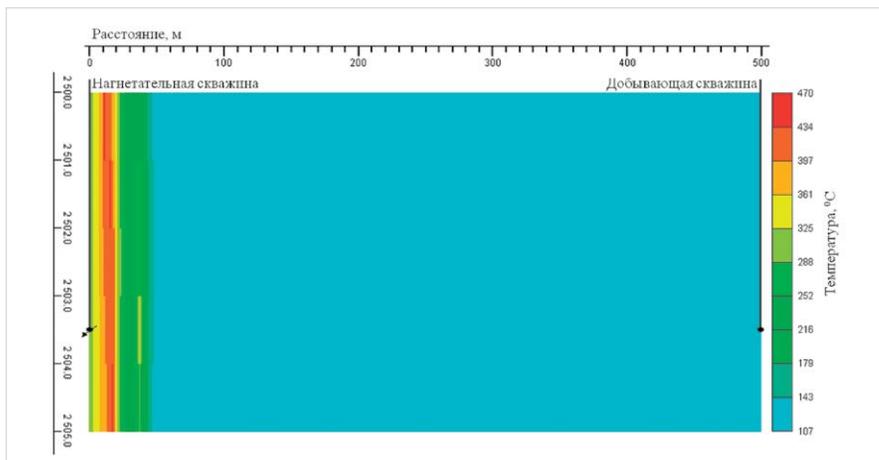


Рис. 6а — Изменение основных параметров процесса ТГВ в дренируемой зоне и в матрице — температура (50 лет закачки)
Fig. 6a — Change of the basic TGT parameters in the drainable zone and in the matrix — temperature (50 years of injection)

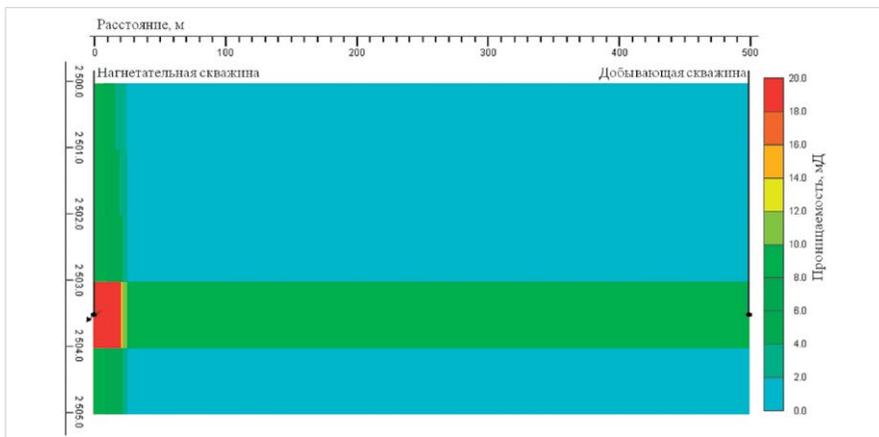


Рис. 6б — Изменение основных параметров процесса ТГВ в дренируемой зоне и в матрице — проницаемость (50 лет закачки)
Fig. 6b — Change of the basic TGT parameters in the drainable zone and in the matrix — permeability (50 years of injection)

При моделировании дренируемой зоны увеличение пористости за счет механизма пиролиза и горения керогена превалирует над геомеханическими процессами сжатия/расширения породы, поэтому наиболее взвешенным решением будет учет изменения проницаемости от пористости в табличном виде.

Зависимость проницаемости от температуры, используемая в модели, приведена на рис. 4.

Основные химические реакции, протекающие в пласте при ТГВ представлены в таб. 4.

Реализация ТГВ на двумерной модели с дренируемой зоной и непроницаемой матрицей

Рис. 5 показывает начальное распределение проницаемости в линейной модели ТГВ с матрицей.

На рис. 6 (а, б, в, г) отражены изменения основных параметров, за счет которых

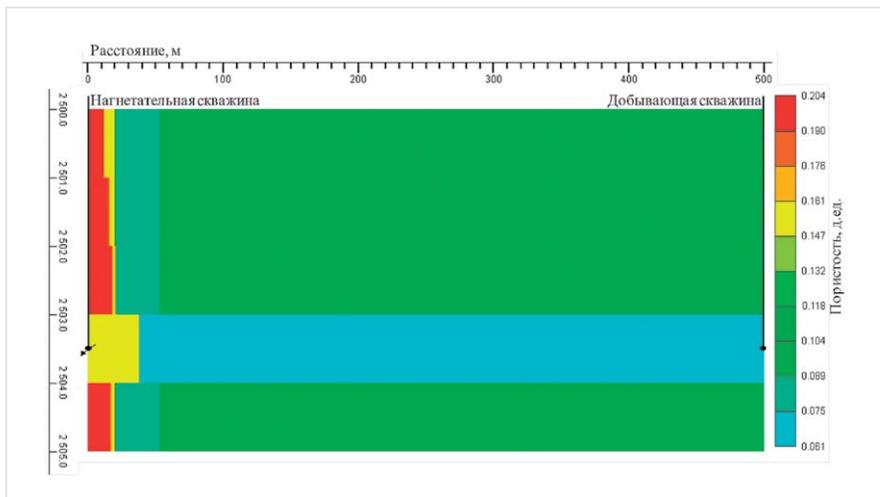


Рис. 6а — Изменение основных параметров процесса ТГВ в дренируемой зоне и в матрице — пористость (50 лет закачки)
 Fig. 6a — Change of the basic TGT parameters in the drainable zone and in the matrix — porosity (50 years of injection)

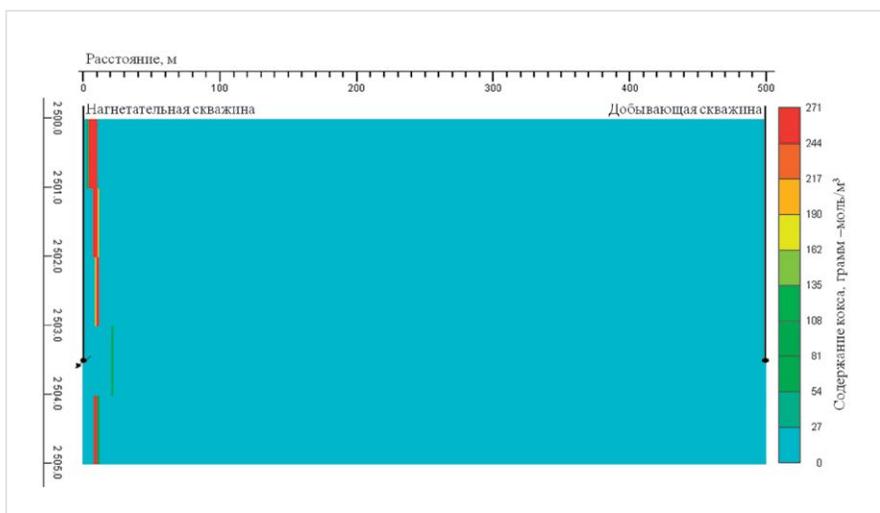


Рис. 6б — Изменение основных параметров процесса ТГВ в дренируемой зоне и в матрице — содержание твердого остатка (50 лет закачки)
 Fig. 6b — Change of the basic TGT parameters in the drainable zone and in the matrix — solid residue content (50 years of injection)

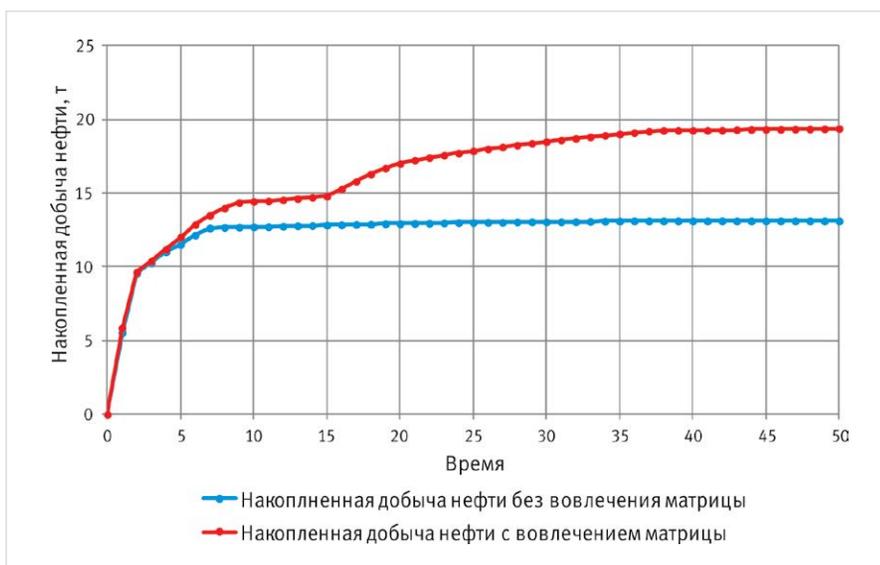


Рис. 7 — Сопоставление накопленной добычи нефти с вовлечением и без вовлечения матрицы, за 50 лет разработки
 Fig. 7 — Correlation between cumulative oil production with and without the matrix during 50 years of the development

достигается главный эффект от ТГВ — дополнительная добыча жидких УВ. Проиллюстрировано изменение температуры, проницаемости и пористости, а также содержания твердого остатка (кокса) на конечный момент времени, с вовлечением матрицы в процесс ТГВ. На рис. 7 приведен график накопленной добычи нефти, иллюстрирующий дополнительный эффект от вовлечения матрицы.

Фронт горения определяется как зона с наибольшей температурой, а также максимальным содержанием кокса, который образуется перед зоной наибольшей температуры. [17]. Рис. 6а и 6б показывают, что за 50 лет фронт горения продвинулся на 25 метров, но стоит отметить, что его положение сильно зависит от множества факторов, таких как:

- интенсивность окисления — скорость реакции;
- объем закачиваемого окислителя, его концентрация;
- скорость его фильтрации;
- характеристика системы нефть — коллектор, а именно содержание керогена (топлива) для реакции горения.

Эффективность ТГВ помимо фронта горения, также характеризуется наличием и других характерных зон для процесса ТГВ (зона испарения, зона конденсации испарившейся нефти, зона смешивающегося вытеснения, рис. 1), что в итоге и формирует суммарный эффект ТГВ.

На рис. 8 представлено распределение начальной нефтенасыщенности, на рис. 9 — нефтенасыщенность через 1,5 года добычи. Показан резкий рост накопленной добычи на рис. 7 за первые полтора года — отбор начальных запасов нефти (начальной нефтенасыщенности) дренируемой зоны. Последующий рост и стабилизация накопленной добычи нефти (рис. 6) связаны с приходом очередных валов нефти, за счет реализации термогазового воздействия ТГВ. На рис. 9 это показано полосой более насыщенного зеленого цвета.

Расчетный технологический эффект за 50-летний период реализации ТГВ на модели (с вовлечением матрицы в разработку) составил около 50% дополнительной добычи нефти, относительно варианта ТГВ без вовлечения матрицы.

Итоги

На двумерной модели поэтапно проведена численная реализация ключевых процессов и явлений, протекающих при ТГВ применительно к пластам баженовской свиты. Перед численной реализацией ТГВ для условий баженовской свиты, были решены вопросы, касающиеся значений ФЕС и их изменения в процессе воздействия. На первом этапе моделирования выделены основные зоны, характеризующие процесс, и дано физическое обоснование отдельным показателям. На втором этапе в линейную модель было дополнительно введена первоначально непроницаемая толща, характеризующая матрицу. Проведены расчеты вариантов с вовлечением матрицы в процесс дренирования.

Выводы

При реализации ТГВ на двумерной модели в условиях баженовской свиты, с учетом лабораторных исследований керн и флюидов

пластов баженовской свиты, были получены качественные результаты. Отличием от предыдущих работ, выполненных на эту тему, является то, что авторами был описан подход к моделированию ТГВ и реализован механизм динамического изменения ФЕС от изменения термобарических условий в недриенируемой толще, то есть процесс ТГВ численно реализован полностью в рамках одного гидродинамического симулятора – CMG STARS. Стоит отметить, что полученные результаты приводятся в единицах относительного прироста, малые абсолютные числа прироста связаны с размером моделируемого объекта – линейная модель. В дальнейшем авторами планируется реализовать процесс ТГВ на полномасштабной модели, с воспроизведением реальных промысловых данных. Данная работа может послужить хорошей базой для оценки характерных зон ТГВ и получения сопоставимых результатов.

Авторы выражают огромную благодарность А.А. Боксерману за ценные советы и консультации по методу термогазового воздействия.

Список литературы

- World Energy Outlook 2014 // International Energy Agency. 2014. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2014.pdf>
- Алекперов В.Ю., Грайфер В.И., Николаев Н.М., Карпов В.Б., Кокорев В.И. и др. Новый отечественный способ разработки месторождений баженовской свиты (часть 1) // Нефтяное хозяйство. 2013. №12. С. 100–105.
- Алекперов В.Ю., Грайфер В.И., Николаев Н.М., Карпов В.Б., Кокорев В.И. и др. Новый отечественный способ разработки месторождений баженовской свиты (часть 2) // Нефтяное хозяйство. 2014. №1. С. 50–53.
- Сонич В.П., Батурич Ю.Е., Малышев А.Г., Зарипов О.Г., Шеметилло В.Г. Проблемы и перспективы освоения Баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. 2001. №9. С. 63–68.
- Палий А.П. Результаты и перспективы развития термогазового способа разработки месторождений с нетрадиционными запасами. XVI конференция молодых специалистов, работающих в организациях, осуществляющих деятельность, связанную с использованием участков недр на территории Ханты-мансийского автономного округа – Югры, тезисы докладов. Ханты-Мансийск, 2016.
- Батурич Ю.Е., Сонич В.П., Малышев А.Г., Зарипов О.Г., Шеметилло В.Г. Оценка перспектив применения гидротермовоздействия в пласте ЮО месторождений ОАО «Сургутнефтегаз» // Интервал. 2002. №1. С. 17–36.
- А.А. Боксерман, Кокорев В.И., Плынин В.В., Ушакова А.С. Современное состояние и перспективы применения термогазового метода увеличения

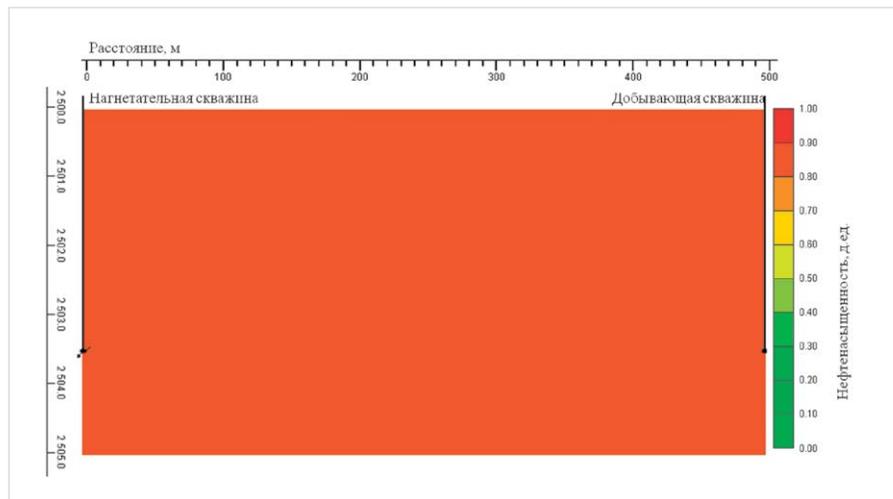


Рис. 8 — Распределение начальной нефтенасыщенности
Fig. 8 — Initial oil saturation distribution

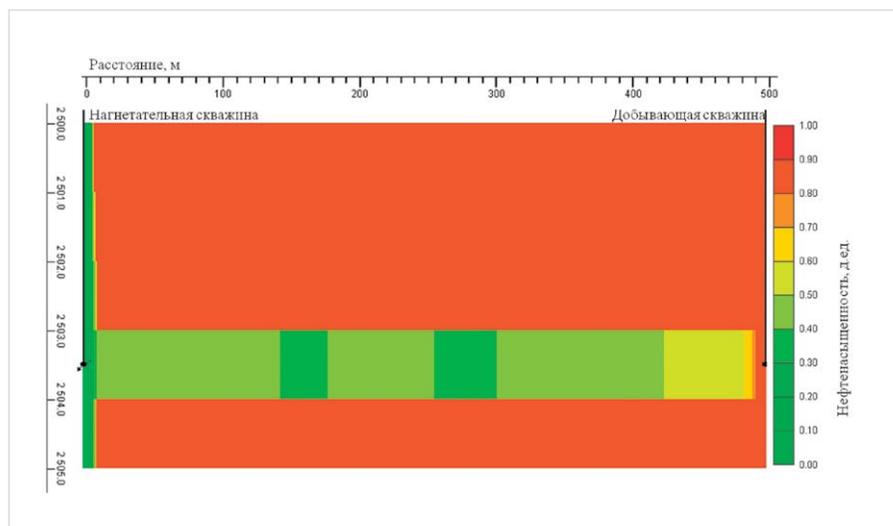


Рис. 9 — Распределение нефтенасыщенности через 1,5 года добычи
Fig. 9 — Oil saturation distribution in 1.5 years of the development

- нефтеотдачи на месторождениях баженовской свиты. II Международная конференция. Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям, тезисы докладов. Москва, 2010.
- Ямбаев М. Ф. Основные особенности термогазового увеличения нефтеотдачи применительно к условиям сложнопостроенных коллекторов. М., 2006. 153 с.
 - Афанаскин И. В. Повышение технологической эффективности метода направленной закачки воздуха в нефтяные пласты на основе численного моделирования и результатов гидродинамических исследований скважин. М., 2013. 273 с.
 - Диева Н. Н. Гидродинамическое моделирование термохимического воздействия на пласты трудноизвлекаемых углеводородов. М., 2015. 113 с.
 - Щеколдин К. А. Обоснование технологических режимов термогазового воздействия на залежи

- баженовской свиты. М., 2016. 126 с.
- Шевченко А.В. Разработка и реализация численных методов моделирования многокомпонентной неизотермической фильтрации. М., 2015. 96 с.
 - Кокорев В.И. Техничко-технологические основы инновационных методов разработки месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными запасами нефти. М., 2010. 318 с.
 - Алексеев Ю.В., Ерофеев А.А., Пачежерцев А.А., Меретин А.С., Никитин Р.Н. Перспективы применения термохимических методов воздействия при разработке залежей баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. 2015. №9. С. 93–97.
 - Желтов, Ю.П. Разработка нефтяных месторождений. М.: Недра, 1986. 332 с.
 - Бурже Ж., Сурио П., Комбарну М. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1989. 422 с.
 - Computer Modeling Group LTD. Stars user guide. Advanced processes and thermal reservoir simulator, 2016.

Numerical implementation of the thermal gas technology mechanism in the 2D model

UDC 622.276

Authors:

Artur M. Shakhmaev — post-graduate student¹; 89artur.shakhmaev@gmail.com

Yaroslav O. Simakov — deputy director for production engineering²; yaroslav.s.olegovich@gmail.com

Petr V. Pyatibratov — associate professor¹; pyatibratov.p@gmail.com

Ashot A. Mosesyan — engineer¹; mosesyan@gmail.com

¹Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation

²LLC "Petek", Moscow, Russian Federation

Abstract

A decline in the oil production from the Russian nonshale reservoirs has currently been happening; regardless of the existing alternate energy source development trends, hydrocarbon resource consumption will expand, according to several released reports [1]. Deposits of the Bazhenov suite are one of the alternate hydrocarbon reserves. This article describes a 2D modeling of thermal gas technology (hereinafter – TGT) for the deposits of the Bazhenov suite considering peculiarities of the latter, and allowances related to the simulator limitations.

Materials and methods

The methods of the deposits of the Bazhenov suite depletion, hydraulic fracturing, sodium surfactant polymer treatment of formation (ASP

flooding), TGT are considered at the moment.

Results

The 2D model shows a step-by-step numerical implementation of the key processes and occurrences ongoing during the thermal gas technology with regard to the deposits of the Bazhenov suite.

The first phase of the modeling allots main areas characterizing the process, and gives a physical rationale to the certain indicators. The second phase introduces a primarily impermeable sequence into the model characterizing the matrix. The options are calculated with the matrix involved in the drainage process.

Conclusions

Qualitative results are obtained during the TGT

at the deposits of the Bazhenov suite conditions considering the 2D model, core and formation fluids laboratory analysis. This work differs from those previously released in the fact that the authors describe a certain approach to the TGT modeling, and implement a mechanism of the dynamic change of the reservoir porosity and permeability from changing the pressure and temperature conditions in the nondrainable sequence; i.e. the TGT process is numerically implemented in full by one hydrodynamic simulator, which is CMG STARS.

Keywords

deposits of the Bazhenov suite, thermal gas technology, drainable and nondrainable formations, kerogen, coke, interbedding combustion, modeling, 2D model, enhanced oil recovery methods

References

- World Energy Outlook 2014, International Energy Agency, 2014. Available at: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2014.pdf>
- Alekperov V.Yu., Grayfer V.I., Nikolaev N.M., Karpov V.B., Kokorev V.I. and oth. *Novyy otechestvennyy sposob razrabotki mestorozhdeniy bazhenovskoy svity (chast' 1)* [A new domestic method for developing deposits of the Bazhenov suite (part 1). Oil industry, 2013, Issue 12, pp. 100–105.
- Alekperov V.Yu., Grayfer V.I., Nikolaev N.M., Karpov V.B., Kokorev V.I. and oth. *Novyy otechestvennyy sposob razrabotki mestorozhdeniy bazhenovskoy svity (chast' 2)* [A new domestic method for developing deposits of the Bazhenov suite (part 2). Oil industry, 2014, Issue 1, pp. 50–53.
- Sonich V.P., Baturin Yu.E., Malyshev A.G., Zaripov O.G., Shemetillo V.G. *Problemy i perspektivy osvoeniya Bazhenovskoy svity* [Problems and prospects for the development of the Bazhenov suite]. Oil industry, 2001, issue 9, pp. 63–68.
- Paliy A.P. *Rezultaty i perspektivy razvitiya termogazovogo sposoba razrabotki mestorozhdeniy s netraditsionnymi zapasami* [Results and prospects of development of the thermogas method of development of deposits with non-traditional reserves]. XVI conference of young specialists, who working in company which develop oil field in Khanty-Mansiisk autonomous district —Yugra. Khanty-Mansiysk, 2016.
- Baturin Yu.E., Sonich V.P., Malyshev A.G., Zaripov O.G., Shemetillo V.G. *Otsenka perspektiv primeneniya gidrotermovozdeystviya v plaste YuO mestorozhdeniy OAO «Surgutneftegaz»* [Estimation of the prospects for the use of hydroelectricity in the reservoir of the South fields of OJSC "Surgutneftegas"]. *Interval*, 2002, issue 1, pp. 17–36.
- A.A. Bokserman, Kokorev V.I., Plynin V.V., Ushakova A.S. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy primeneniya termogazovogo metoda uvelicheniya nefteotdachi na mestorozhdeniyakh bazhenovskoy svity* [Current state and prospects for the application of the thermogas method of increasing oil recovery at the deposits of the Bazhenov suite]. II International conference. Nanophenomena during development of oil field: from nanominerology and nanochemistry to nanotechnology. Moscow, 2010.
- Yambaev M. F. *Osnovnye osobennosti termogazovogo uvelicheniya nefteotdachi primenitel'no k usloviyam slozhnopostroennykh kollektorov* [The main features of the thermogas increase in oil recovery in the context of complex reservoirs]. Moscow, 2006, 153 p.
- Afanaskin I. V. *Povyshenie tekhnologicheskoy effektivnosti metoda napravlennoy zakachki vozdukha v neftyanye plasty na osnove chislennogo modelirovaniya i rezul'tatov gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin* [Increase of technological efficiency of the method of directed injection of air into oil reservoirs on the basis of numerical simulation and the results of hydrodynamic studies of wells]. Moscow, 2013, 273 p.
- Dieva N. N. *Gidrodinamicheskoe modelirovanie termokhimicheskogo vozdeystviya na plasty trudnoizvlekaemykh uglevodorodov* [Hydrodynamic modeling of thermochemical impact on formations of hard-to-recover hydrocarbons]. Moscow, 2015, 113 p.
- Shchekoldin K. A. *Obosnovanie tekhnologicheskikh rezhimov termogazovogo vozdeystviya na zalezhi bazhenovskoy svity* [Justification of technological modes of thermogas effect on deposits of the Bazhenov suite]. Moscow, 2016, 126 p.
- Shevchenko A.V. *Razrabotka i realizatsiya chislennykh metodov modelirovaniya mnogokomponentnoy neizotermicheskoy fil'tratsii* [Development and implementation of numerical methods for modeling multicomponent nonisothermal filtration]. Moscow, 2015, 96 p.
- Kokorev V.I. *Tekhniko-tekhnologicheskie osnovy innovatsionnykh metodov razrabotki mestorozhdeniy s trudnoizvlekaemyimi i netraditsionnymi zapasami nefi* [Technical and technological fundamentals of innovative methods for developing deposits with hard-to-recover and unconventional oil reserves]. Moscow, 2010, 318 p.
- Alekseev Yu.V., Erofeev A.A., Pachezhertsev A.A., Meretin A.S., Nikitin R.N. *Perspektivy primeneniya termokhimicheskikh metodov vozdeystviya pri razrabotke zalezhey bazhenovskoy svity* [Prospects of application of thermochemical methods of influence in the development of deposits of the Bazhenov suite]. Oil industry, 2015, issue 9, pp. 94–97.
- Zheltoy, Yu.P. *Razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy* [Development of oil deposits]. Moscow: Nedra, 1986, 332 p.
- Burzhe Zh., Surio P., Kombarnu M. *Termicheskie metody povysheniya nefteotdachi plastov* [Thermal methods for enhanced oil recovery]. M.: Nedra, 1989, 422 p.
- Computer Modeling Group LTD. Stars user guide. Advanced processes and thermal reservoir simulator, 2016.