

Численная оценка эффективности влажного горения термогазового воздействия на двумерной модели

А. М. Шахмаев

аспирант¹

89artur.shakhmaev@gmail.com

Я. О. Симаков

заместитель начальника по моделированию
департамента разработки месторождений²

varoslav.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,
Москва, Россия

²ООО «Петек», Москва, Россия

Основной отличительной особенностью влажного горения является использование тепловых свойств насыщенного пара, способного аккумулировать в себе гораздо больше тепла, чем остальные газовые агенты. Данная особенность водяного пара наиболее обширно применяется в таких тепловых методах, как паротепловое воздействие, SAGD, паро-циклические обработки. В данной работе, на двумерной модели, будет представлена оценка эффективности влажного горения при реализации термогазового воздействия (далее — ТГВ) на пласты баженовской свиты.

Материалы и методы

Гидродинамический симулятор CMG STARS, который позволяет моделировать тепловые и газовые методы увеличения нефтеотдачи.

Ключевые слова

баженовская свита, термогазовое воздействие, дренируемые и недренируемые пласты, кероген, кокс, внутрислоевое горение, сухое горение, влажное горение, моделирование, 2D модель

В статье [1] подробно описана методика численной реализации термогазового воздействия (далее — ТГВ) в условиях баженовской свиты.

Были рассмотрены имеющиеся в последней версии симулятора CMG STARS инструменты, позволившие численно реализовать механизм ТГВ на пластах баженовской свиты как в дренируемой, так и недренируемой зоне пласта. В результате проделанной работы удалось качественно воспроизвести все процессы и сопутствующие эффекты при реализации ТГВ.

В соответствии с патентом РФ №2418944 Способ разработки нефтесодержащих месторождений [2], с технологической точки зрения, успешная реализация ТГВ возможна при оптимальном составе смеси, закачиваемой в пласт, а именно закачке водовоздушной смеси с водовоздушным отношением (далее — ВВО) $0,001 \text{ м}^3/\text{нм}^3$, то есть при реализации влажного горения.

Эффект от реализации влажного горения при ТГВ

Дополнительная закачка воды, попеременно или одновременно с закачкой воздушной смеси, должна позволить активизировать процесс переноса тепла, аккумулированного за фронтом горения, в область перед фронтом горения и далее, тем самым увеличивая область пласта, подвергнутую тепловому воздействию.

Эффективность влажного горения зависит от размера зоны насыщенного пара (так называемого, парового плато). Очевидно, что его можно регулировать, изменяя количество закачиваемой воды или ВВО. Рабочий диапазон ВВО, обеспечивающий оптимальное влажное горение (максимальное паровое плато), лежит, как правило, в диапазоне $0,0007-0,005 \text{ м}^3/\text{нм}^3$ [3].

Отношение выше $0,005 \text{ м}^3/\text{нм}^3$ соответствует уже сверхвлажному горению, в процессе которого закачиваемая вода с определенного момента в жидком виде внедряется в зону горения, существенно снижая температуру и фактически останавливая процесс горения, сменяя его окислительными процессами [4].

В условиях керогеносодержащего коллектора баженовской свиты это означает уменьшение температуры до отметки ниже температуры пиролиза и полное прекращение термодеструкции керогена. Дополнительный уход тепла в матрицу ускорит снижение температуры. Для целей вовлечения недренируемых зон за счет тепловой обработки, сверхвлажное горение с большой долей вероятности не подходит. Поэтому в данной работе такие варианты рассматриваться не будут.

Суть влажного горения заключается в способности пара аккумулировать большое количество тепла и переносить его в область перед фронтом горения и далее. Именно реализация этого механизма становится

главной задачей при численном моделировании процесса.

Оценка влажного горения при реализации ТГВ в условиях баженовской свиты реализована на симуляторе CMG STARS. Кроме того, на симуляторе STARS удалось получить качественный результат при численном воспроизведении физико-химических процессов, протекающих при реализации ТГВ в условиях баженовской свиты [1].

Определение энтальпии рабочих агентов в симуляторе CMG STARS

Основной механизм, реализуемый при влажном горении — образование парового плато, который определяется энтальпией рабочих агентов, а именно водяного пара. Симулятор STARS допускает определение параметров энтальпии для каждого компонента «по умолчанию». Такой подход обусловлен тем, что достаточно часто на практике отсутствуют данные по энтальпии нефти для различных компонентных составов. Дополнительным ограничением на использование подхода «по умолчанию» является отсутствие в модели несжижаемых компонентов, критическая температура которых может быть достигнута в процессе моделирования. Единственным несжижаемым компонентом (твердые вещества в расчет не берутся) является кислород, критическая температура которого составляет -118°C [5].

В STARS возможно задание нескольких параметров, имеющих непосредственное отношение к определению изменения энтальпии компонента:

- 1) задание зависимости теплоемкости компонента, растворенного в газовой фазе, через определение коэффициентов корреляции;
- 2) задание зависимости теплоемкости компонента, растворенного в жидкой фазе, через определение коэффициентов корреляции;
- 3) задание зависимости энтальпии парообразования сжижаемого компонента от температуры, через определение коэффициентов корреляции.

Энтальпия компонента в условиях выше критической температуры приравнивается в симуляторе к энтальпии компонента в жидкой фазе. В данном случае STARS рекомендует пользоваться встроеными таблицами для воды и пара [6].

Сопоставление рассчитанной энтальпии парообразования соответствует справочным значениям [7].

При расчете энтальпии фазы симулятор использует линейное правило смешивания.

Расчет влажного горения

Данная работа представляет собой продолжение исследований ТГВ работы [1], поэтому исходные данные размерности модели, параметров пласта и флюидов, а также кинетика химических реакций приняты такими же, как и в предыдущей работе.

Далее при расчете сухого и влажного горения (закачка воздушной и водовоздушной смеси) компонентный состав в STARS задается в виде объемных долей каждого компонента смеси. При расчете различных вариантов объемная доля кислорода осталась равной его мольной доли в модели сухого горения (0,21 д. ед.), доля воды составила 0,001, 0,002, 0,004 д. ед. (в зависимости от варианта), азота — 0,789, 0,788, 0,786 д. ед. соответственно. Из-за присутствия воды подвижность водовоздушной смеси ниже, чем воздуха, поэтому приемистость скважины может уменьшиться. В этой ситуации допустима корректировка объемной доли кислорода. В любом случае, рассчитанные варианты должны сравниваться в одинаковых условиях, т. е. количество закачиваемого кислорода должно быть одинаковым по всем вариантам.

На рис. 1 приведены показательные расчеты по образованию парового плато (закачка воздушной и водовоздушной смеси с BVO 0,002 м³/нм³). График отображает общий вид распределения температуры и образующих зон испарения, а также насыщенного пара в процессе ТГВ с закачкой воздушной и водовоздушной смесей (BVO 0,002 м³/нм³) на двумерной модели через 20 лет закачки. На рис. 1 видно образование парового плато при закачке водовоздушной смеси, можно

отметить увеличение, практически в 2 раза, зоны насыщенного пара при влажном горении. Как только происходит снижение, это свидетельствует о том, что произошла частичная конденсация.

Реализация влажного горения заметно отличается от сухого горения. Особенно это проявляется в распределении тепла, в размерах зон испарения и насыщенного пара. Как видно из рис. 1, при сухом горении, заметная доля от общего количества тепла, оставшегося за фронтом, была перенесена в зону перед фронтом. При этом общее количество тепла, аккумулированного в пласте к данному моменту времени, сохранилось.

Таким образом, отмечается достижение результата, согласующегося с представлениями, схематически отраженными в [8].

Как уже говорилось выше, наличие постоянной температуры в зоне насыщенного пара (паровое плато) является своего рода идеализированным представлением, исключающим из внимания эффект теплопотерь, безусловно имеющийся в реальных условиях.

Для дополнительного подтверждения данных рассуждений можно проиллюстрировать сказанное расчетом варианта влажного горения без учета теплопотерь и, тем самым, визуальную оценку максимального количества тепла, переносимого паром (оценка сверху).

На рис. 2 приведено сравнение температурных профилей для вариантов расчета влажного и сухого горения без учета теплопотерь. Эти графики хорошо иллюстрируют аккумулирующий потенциал пара, который в случае идеальной замкнутой системы переносит практически все тепло в зону перед фронтом горения. Тепло аккумулируется, и с течением времени зона постоянной температуры растет. Обращает на себя внимание также более низкая температура этой зоны, что объясняется процессом переноса тепла вперед, в том числе, и с фронта горения. Однако несмотря на значительно высокую температуру на фронте, сухое горение не может обеспечить соответствующий влажному горению перенос тепла в зону перед фронтом.

В случае же наличия теплопотерь пар, одновременно с захватом и переносом тепла, отдает его внешним породам, что приводит к постепенному снижению температуры перед фронтом. Однако это снижение, как можно видеть из рис. 2, происходит менее интенсивно, чем в случае сухого горения.

На рис. 3 приведено сопоставление температурных профилей по вариантам влажного горения, с тремя различными значениями водовоздушного отношения, соответственно.

С ростом водовоздушного отношения температура перед фронтом горения падает. Как уже отмечалось выше, это связано с

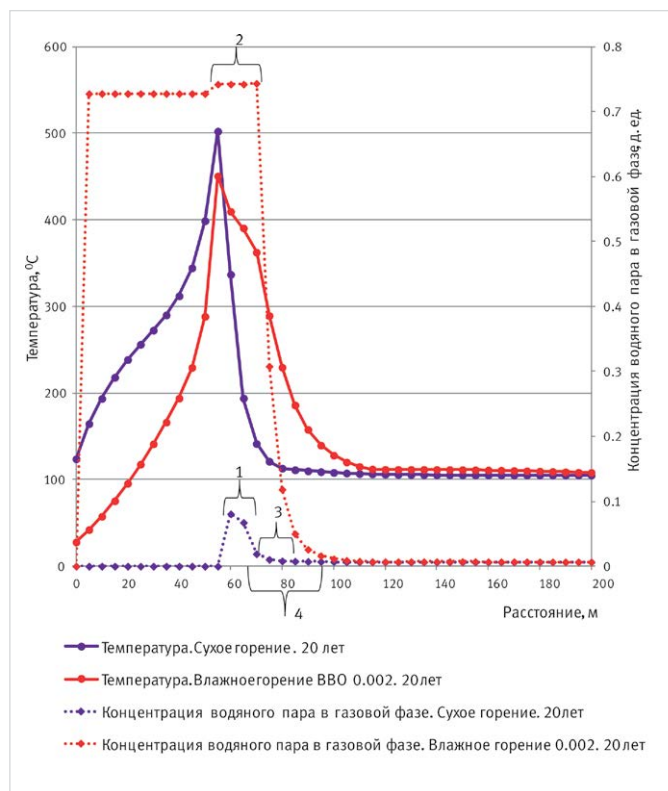


Рис. 1 — Температурные профили и зоны испарения при закачке воздушной и водовоздушной смесей (BVO 0,002 м³/нм³) через 20 лет:

- 1 — зона испарения при сухом горении (7 м);
- 2 — зона испарения при влажном горении (15 м);
- 3 — зона насыщенного пара при сухом горении (10 м);
- 4 — зона насыщенного пара при влажном горении (20 м)

Fig. 1 — Thermal profiles and evaporation zones when injecting air and water-air mixtures

(0.002 м³/нм³ air-water ratio) in 20 years:

- 1 — dry combustion evaporation zone (7 m);
- 2 — wet combustion evaporation zone (15 m);
- 3 — dry combustion saturated vapor zone (10 m);
- 4 — wet combustion saturated vapor zone (20 m)

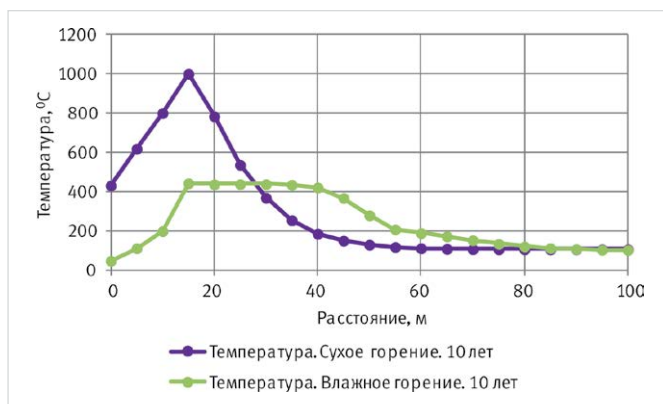


Рис. 2 — Сравнение температурных профилей при реализации влажного и сухого горения без учета теплопотерь
Fig. 2 — Thermal profile comparison during wet and dry combustion not considering heat loss

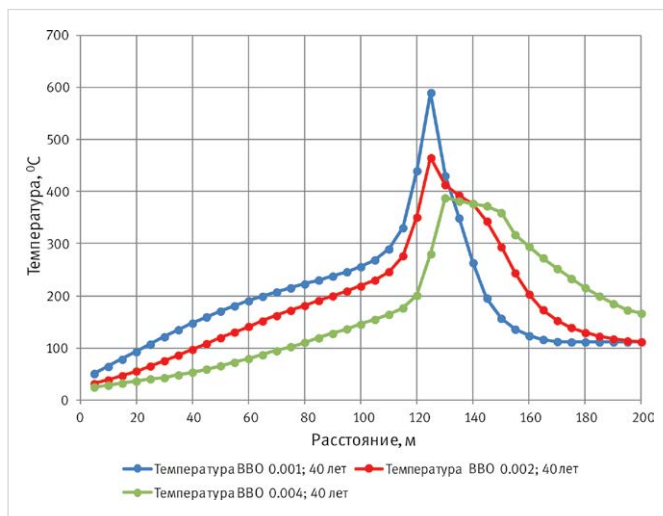


Рис. 3 — Сопоставление температурных профилей по вариантам с влажным горением
Fig. 3 — Thermal profile comparison by options with wet combustion

переносом тепла паром вперед, в том числе с фронта горения. Постепенно, с увеличением водовоздушного отношения, температура на фронте и перед ним выравнивается. Отмечается, что в варианте с ВВО $0,004 \text{ м}^3/\text{нм}^3$ (зеленая кривая, рис. 3) практически все тепло переносится в зону перед фронтом горения. Таким образом, наиболее эффективным вариантом воздействия можно считать влажное горение с водовоздушным соотношением $0,004$, которое будет считаться оптимальным в данном конкретном случае.

Результаты эффективности реализации влажного горения. Учет добычи синтетической нефти

На рис. 4 приведена накопленная добыча нефти в жидкой фазе за рассматриваемый период (20 лет). Как видно из рис. 3 и 4, с ростом ВВО увеличивается паровое плато, что увеличивает зону перед фронтом горения, охваченную тепловым воздействием. В следствие этого увеличивается количество испаренной нефти, которая быстрее переносится вперед, конденсируется и образует

нефтяные валы. За первые два года происходит отбор первоначальных запасов нефти (начальной нефтенасыщенности). Излом на отметке второго года характеризует окончание отбора первоначальных запасов нефти, следующий отбор характеризуется приходом первого нефтяного вала, последующий период с 7-го по 10-ый год характеризуется практически отсутствием добычи, т.к. начальные запасы отобраны, а очередной вал нефти еще не пришел. Увеличение накопленной добычи в 11-ом году связано с приходом очередного вала нефти, естественно, меньшего объема.

Вышеописанный процесс проиллюстрирован на рис. 4. С увеличением ВВО приход очередного вала нефти происходит быстрее, то есть увеличение ВВО будет интенсифицировать отборы нефти. Ярко выраженное отображение изломов на данном рисунке связано с моделированием процесса ТГВ на линейной модели. Подобное поведение накопленной добычи нефти (изломы) наблюдаются и в работе [1].

Также показательным, с точки зрения критерия оценки эффективности ТГВ, может быть выбран дополнительный отбор синтетической нефти. Большая часть синтетической нефти выносится к добывающей скважине в составе газовой фазы. На рис. 5 приведено сравнение отборов синтетической нефти в составе газовой фазы по различным модификациям влажного горения, сухого горения и закачки газового агента (без процессов горения и окисления). Эффект тем больше, чем больше ВВО. Это связано с тем, что с ростом ВВО увеличивается зона прогрева перед фронтом горения. При отсутствии внутрискважинного горения отбор синтетической нефти, естественно, равен нулю. Если оценить относительный эффект, то по отношению к накопленной добыче в жидкой фазе, отбор синтетической нефти в газовой фазе дает 25% дополнительного прироста к добыче. Поведение кривых на рис. 5 объясняется приходами валов нефти для накопленной добычи.

Ввиду условностей двумерной модели, авторы не акцентировали внимание на количественном результате, представленном в данной работе. Результаты оценивались по относительному приросту дополнительной добычи нефти. В дальнейшем авторами планируется реализовать процесс ТГВ на полномасштабной модели, чтобы получить количественные результаты, опираясь на относительные оценки, полученные в данной работе.

Итоги

В ходе проделанной работы была проведена оценка эффективности влажного горения при реализации процесса ТГВ, моделирование осуществлялось на двумерной модели. Результаты расчетов наглядно демонстрируют преимущество применения влажного горения с точки зрения интенсификации отбора запасов пластовой нефти, а также количества дополнительной отобранной синтетической нефти в результате реакции пиролиза керогена.

Выводы

По результатам работы установлено, что ВВО $0,004 \text{ м}^3/\text{нм}^3$ показало наилучшую эффективность, но с учетом матрицы как полноценного объекта при моделировании, произойдет перераспределение закачки воздуха

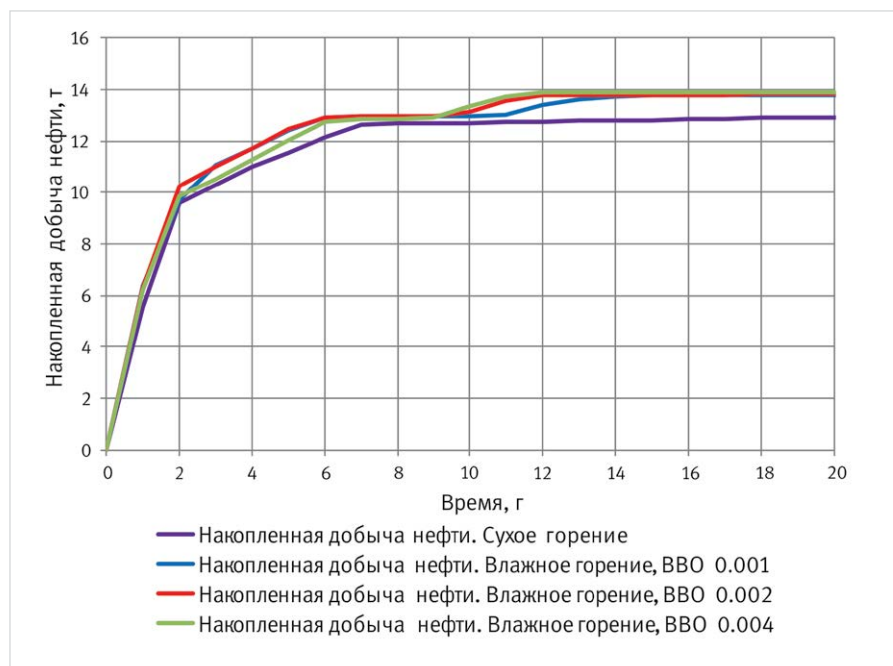


Рис. 4 — Сравнение накопленной добычи нефти по различным вариантам теплового воздействия (с разным ВВО и без ВВО)

Fig. 4 — Cumulative oil production comparison by different options of thermal technology (with a different air-water ratio and without any air-water ratio)

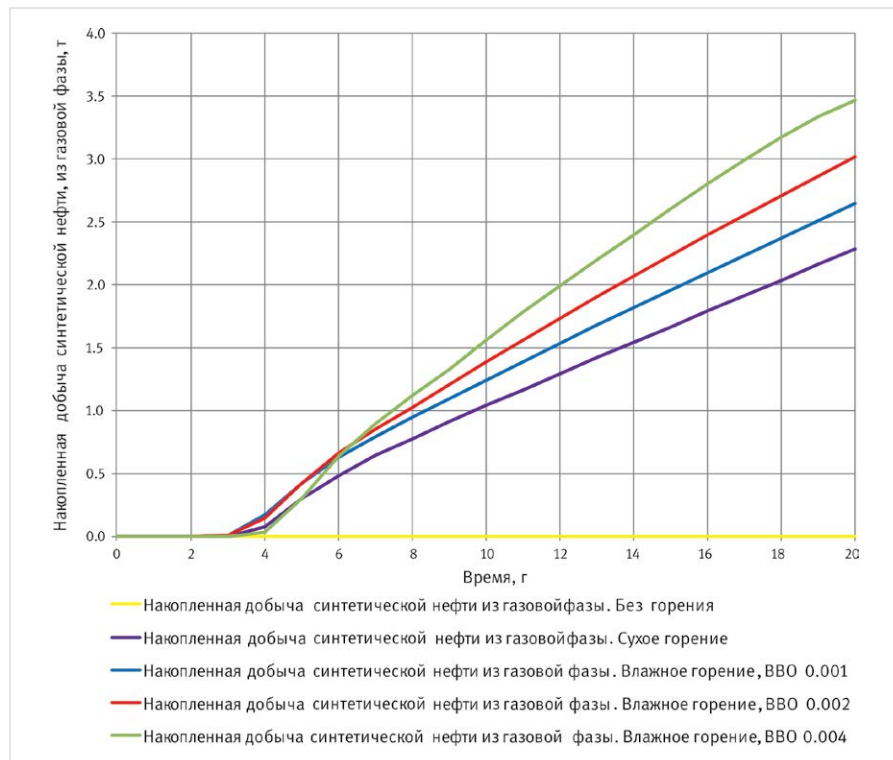


Рис. 5 — Сравнение отборов синтетической нефти по вариантам: без горения, при сухом и влажном горении

Fig. 5 — Syncrude selection comparison by options: without combustion, during dry and wet combustion

по всей толще. В результате температура в матрице и повсеместно может упасть ниже требуемого уровня реакции пиролиза (ниже 350 °C). В этой ситуации стоит рассмотреть вариант с закачкой водовоздушной смеси с диапазоном ВВО 0,001–0,002 м³/нм³, как рекомендуемый. В таком случае можно быть уверенным, что температура на фронте горения будет поддерживаться на требуемом для реакции пиролиза уровне, и как следствие, будет возможна дополнительная добыча синтетической нефти (данный механизм является одним из основных в процессе ТГВ). В то же время, будет происходить прогрев больших объемов пород, за счет механизма влажного горения. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости поиска оптимального водовоздушно-газового отношения.

Список литературы

1. Шахмаев А.М., Симаков Я.О., Пятибратов П.В., Мосесян А.А. Численная реализация механизма термического воздействия на двумерной модели // Экспозиция Нефть Газ. 2018. №1. С. 39–45.
2. Патент №2418944. Способ разработки нефтекерогеносодержащих месторождений, приоритет от 16.04.2010, кл. Е 21 В 43/24.
3. Боксерман А.А., Власов В.Н., Плынин В.В., Фомкин А.В., Ушакова А.С. Первичная оценка влияния водовоздушного отношения на эффективность разработки баженовской свиты термическим методом // Нефтепромысловое дело. 2011. №2. С. 12–15.
4. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1985. 308 с.
5. Computer Modeling Group LTD. Stars user guide. Advanced processes and thermal reservoir simulator, 2016.
6. Keenan, J.H., Keyes, F.G., Hill P.G., Moore J.G. Steam Tables — thermodynamic properties of water including steam, liquid, and solid phases. New York: Wiley, 1969. 162 p.
7. Большой энциклопедический справочник. М.: Русское энциклопедическое товарищество, 2003. 576 с.
8. Бурже Ж., Сурио П., Комбарну М. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов М.: Недра, 1989. 422 с.

ENGLISH

PRODUCTION

Numerical evaluation of the wet combustion efficiency of the thermal gas technology on a 2D model

UDC 622.276

Authors:

Artur M. Shakhmaev — doctoral student¹; 89artur.shakhmaev@gmail.com

Yaroslav O. Simakov — deputy director for modeling of the field development department²; yaroslav.s.olegovich@gmail.com

Petr V. Pyatibratov — Ph.D. in Technical Sciences, assistant professor of the oil field development and exploitation department²; pyatibratov.p@gmail.com

Ashot A. Mosesyan — engineer of the oil and gas well drilling department¹; mosesyan@gmail.com

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

²LLC "Petek", Moscow, Russian Federation

Abstract

Using thermal properties of saturated steam able to accumulate more heat than the other gas agents is the main distinctive feature of the wet combustion. This feature of the steam is most widely used in such thermal methods as steam treatment, SAGD, huff-and-puff treatment.

This work evaluates the efficiency of the wet combustion on a 2D model during the thermal gas technology (hereinafter – TGT) of the Bazhenov formation.

Materials and methods

CMG STARS hydrodynamic simulator allowing modeling thermal and gas oil recovery enhancement methods

Results

The efficiency of the wet combustion was evaluated during the work when implementing TGT on a 2D model. The results of the calculation illustrate advantage of the wet combustion from the point of view of the intensification of the oil in place recovery, and of the amount of the additional recovered synthetic oil as a result of the kerogen pyrolysis reaction.

Conclusions

The results of the work established that the 0.004 m³/Nm³ air-water ratio showed the best efficiency; however, considering matrix a proper modeling object, air injection will redistribute through the whole formation. As a result, the matrix temperature and everywhere may fall below the level required for the pyrolysis reaction (below 350 °C). In this

case, one should consider an option to inject the air-water mixture with 0.001–0.002 m³/Nm³ as a recommendation. Then we can be assured that the combustion front temperature will be maintained at the level required for the pyrolysis reaction, and consequentially additional production of the synthetic oil will be possible (this mechanism if one of the basic ones in the TGT process). At the same time, larger volumes of rocks will be treated due to the wet combustion mechanism. Thus, it is possible to make a conclusion that finding an optimal air-water ratio is required.

Keywords

Bazhenov formations, thermal gas technology, drained and non-drained formations, kerogen, coke, in-situ combustion, dry combustion, wet combustion, modeling, 2D model

References

1. Shakhmaev A.M., Simakov Ya.O., Pyatibratov P.V., Mosesyan A.A. *Chislennaya realizatsiya mekhanizma termogazovogo vozdeystviya na dvumernoy modeli* [Numerical implementation of the thermal gas technology mechanism on a 2D model]. Exposition Oil Gas, 2018, issue 1, pp. 39–45.
2. Patent №2418944. *Sposob razrabotki neftekrogenosoderzhashchikh mestorozhdeniy* [Oil and kerogenic field development method]. Priority from 16.04.2010, kl. E 21 B 43/24.
3. Bokserman A.A., Vlasov V.N., Plynin V.V., Fomkin A.V., Ushakova A.S. *Pervichnaya otsenka vliyaniya vodovozdushnogo otnosheniya na effektivnost' razrabotki bazhenovskoy svity termogazovym metodom* [Primary evaluation of the water-air relation impact on the efficiency of the Bazhenov formation development by thermal gas method]. *Neftpromyslovoe delo*, 2011, issue 2, pp. 12–15.
4. Surguchev M.L. *Vtorichnye i tretichnye metody uvelicheniya nefteotdachi plastov* [Secondary and tertiary oil recovery methods]. Moscow: *Nedra*, 1985, 308 p.
5. Computer Modeling Group LTD. Stars user guide. Advanced processes and thermal reservoir simulator, 2016.
6. Keenan, J.H., Keyes, F.G., Hill P.G., Moore J.G. Steam Tables — thermodynamic properties of water including steam, liquid, and solid phases. New York: Wiley, 1969, 162 p.
7. *Bol'shoy entsiklopedicheskiy spravochnik* [The Great encyclopedic Reference Book]. Moscow: *Russkoe entsiklopedicheskoe tovarishchestvo*, 2003, 576 p.
8. Burzhe Zh., Surio P., Kombarnu M. *Termicheskie metody povysheniya nefteotdachi plastov* [Thermal oil recovery methods] Moscow: *Nedra*, 1989, 422 p.