

Исследование эффективности теплового воздействия на пласт с вязкопластичной нефтью

Я.В. Невмержицкий
программист¹
nevmerzhitski_y@mail.ru

В.Ю. Семака
инженер-программист¹
semakavadim@gmail.com

А.В. Коныхов
ведущий научный сотрудник¹
konyukhov_av@mail.ru

И.Н. Завьялов
научный сотрудник¹
старший научный сотрудник²
ivenzz@mail.ru

Н.А. Завьялова
старший научный сотрудник^{1,2}
natalia.zavyalova@gmail.com

С.С. Негодяев
директор ФАКТ¹
генеральный директор²
snegod@mail.ru

¹Московский физико-технический институт (МФТИ)

²ООО «Нефтегазовый центр МФТИ»

В статье представлено программное обеспечение для моделирования эффективности тепловых методов увеличения нефтеотдачи (далее — МУН) в пластах с высоковязкими нефтями, а также моделирование вариантов разработки низкопроницаемых коллекторов. Приведены расчеты для трех законов фильтрации нефти и оценен вклад теплового воздействия на накопленную добычу нефти.

Материалы и методы

Тепловые методы увеличения нефтеотдачи, математическое моделирование.

Ключевые слова

трудноизвлекаемые запасы, нелинейная фильтрация, тепловые МУН, численное моделирование

В настоящее время современная нефтедобыча характеризуется ростом доли месторождений с трудноизвлекаемыми запасами, доля которых в России составляет около 20%. Ввиду большой изученности подобных месторождений, а также их расположения в регионах с развитой инфраструктурой, разработка данного типа активов является экономически менее рискованной, чем проекты на арктическом шельфе, и потому представляет интерес для крупных нефтяных компаний. Стоит отметить, что к трудноизвлекаемым запасам относятся как месторождения легкой нефти в низкопроницаемых коллекторах, так и высоковязкой нефти в коллекторах с хорошей проницаемостью. При разработке таких месторождений обнаруживаются явления, не характерные для традиционных месторождений.

В частности, низкопроницаемые пласты, в которых ведется эксплуатационное бурение, характеризуются большими коэффициентами падения добычи, слабой приемистостью и низкой эффективностью поддержания пластового давления (ППД). Установлено, что в низкопроницаемых коллекторах нефть проявляет вязкопластические свойства, а фильтрация не подчиняется классическому линейному закону Дарси [1, 2]. Подобными реологическими свойствами обладает и высоковязкая нефть, что обусловлено комплексным взаимодействием свойств флюидов, размерами и свойствами поровых каналов. В случае фильтрации в низкопроницаемом коллекторе и высоковязкой нефти, размер образующегося пограничного слоя достаточно велик относительно размера порового канала, что и обуславливает аномальную реологию [3]. Корректный учет данного явления необходим для выбора оптимального варианта разработки подобных месторождений.

В настоящее время имеются результаты экспериментальных исследований по определению зависимости реологических свойств высоковязких нефтей от температуры и проницаемости [4]. Установлено, что при увеличении температуры и проницаемости реологические свойства нефти значительно улучшаются, при больших температурах фильтрация происходит по закону Дарси. Поэтому для повышения нефтеотдачи актуальны тепловые методы.

В настоящее время в большинстве коммерческих программных пакетах не предусмотрена возможность моделирования нелинейной реологии нефти, зависящей от температуры, поэтому основной задачей данной работы является создание программы, позволяющей проводить расчеты неизотермической фильтрации флюидов, не подчиняющихся закону Дарси, а также исследование эффективности тепловых МУН на показатели разработки.

Рассматривается плоская двумерная неизотермическая фильтрация воды, легких и тяжелых компонентов нефти.

Предполагается, что нефть проявляет вязкопластические свойства, вода фильтруется по закону Дарси. Поэтому в основу математической модели положены законы сохранения массы водного компонента, легких и тяжелых фракций нефти, а также закон сохранения энергии. Так как одним из тепловых МУН является закачка пара в пласт, то в разрабатываемый симулятор включена процедура расчета фазового равновесия.

Тестирование программы проводилось на известных аналитических решениях (задача Баклея – Леверетта, задача прямолинейно-параллельной нелинейной фильтрации упругой вязкопластической жидкости), а также на результатах расчетов на коммерческом симуляторе (закачка горячей воды и пара в пласт с ньютоновской нефтью). Получена высокая степень сходимости результатов, что позволяет проводить расчеты неизотермической фильтрации нефти со сложной реологией.

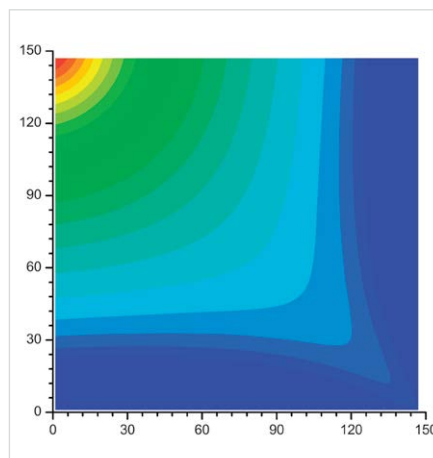


Рис. 1 — Схема расчетной области
Fig. 1 — Computational domain chart

Для исследования влияния тепловых методов на показатели разработки месторождений с неньютоновской нефтью был проведен ряд расчетов. Рассматривались два элемента пятиточечной системы разработки размером 150 м и 75 м. В левом

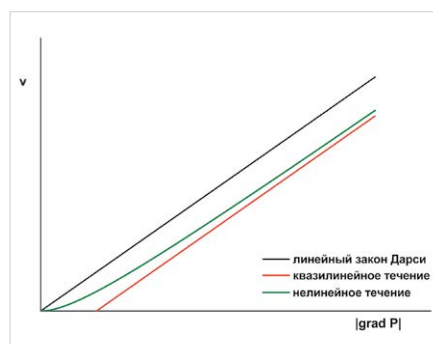


Рис. 2 — Реологические кривые, используемые при моделировании
Fig. 2 — Rheological curves used for modeling

верхнем углу располагается нагнетательная скважина, в правом нижнем углу — добывающая скважина (рис. 1). Моделируется два типа воздействия на пласт: закачка пластовой воды и закачка горячей воды. Расчеты проводились для трех законов фильтрации нефти: кроме линейного закона Дарси, рассматривались нелинейный и квазилинейный законы фильтрации, которые зависели от температуры (рис. 2). Исследовалось влияние только закона фильтрации на показатели разработки, вязкость и плотность флюидов от температуры не зависели.

На рис. 3 представлена зависимость накопленной добычи нефти от времени для проведенных расчетов. Наибольшие значения накопленных отборов получены при фильтрации по закону Дарси, а наименьшие — при квазилинейном законе. Это связано с тем, что при квазилинейном законе фильтрации при градиентах давления меньших предельного движение нефти невозможно, в результате чего формируются застойные зоны, не охваченные воздействием от нагнетательной скважины. При сгущении сетки скважин (со 150 м до 75 м) фронт вытеснения доходит до добывающей скважины, что сказывается на накопленной добыче и дебите нефти (рис. 4). В случае же фильтрации по нелинейному закону, в котором при малых градиентах давления нефть может двигаться, фронт вытеснения доходит до добывающей скважины на обеих сетках, однако дебит и накопленная добыча воды меньше, чем при фильтрации по закону Дарси.

Анализ результатов расчетов также позволяет оценить вклад теплового воздействия на накопленную добычу нефти. Так, закачка горячей воды при квазилинейной фильтрации позволила увеличить накопленную добычу на 3,2 т (15,6 %), а для нелинейного закона фильтрации прирост накопленной добычи нефти составил 39,7 т (1,7 %). При сгущении сетки скважин прирост составил соответственно 686,7 т (700 %) и 392,8 т (15,7 %). Стоит отметить, что выбор закона фильтрации кардинально влияет на результат при сгущении сетки скважин: при закачке холодной воды для линейного закона фильтрации накопленная добыча нефти упала на 1746,7 т (30,6 %), для квазилинейного закона накопленная добыча возросла на 77,3 т (370 %), для нелинейного закона фильтрации — на 204 т (8,9 %).

Итоги

Разработан симулятор, позволяющий проводить расчеты эффективности тепловых МУН при фильтрации нефти по нелинейному закону. Произведено сравнение результатов с известными аналитическими и численными решениями. Исследована эффективность закачки горячей воды в пласт с неньютоновской нефтью.

Выводы

Анализ результатов численного моделирования показывает необходимость учета вязкопластичной реологии нефти как при планировании разработки месторождений с высоковязкой нефтью, так и низкопроницаемых коллекторов.

Полученные результаты показывают важность определения закона фильтрации

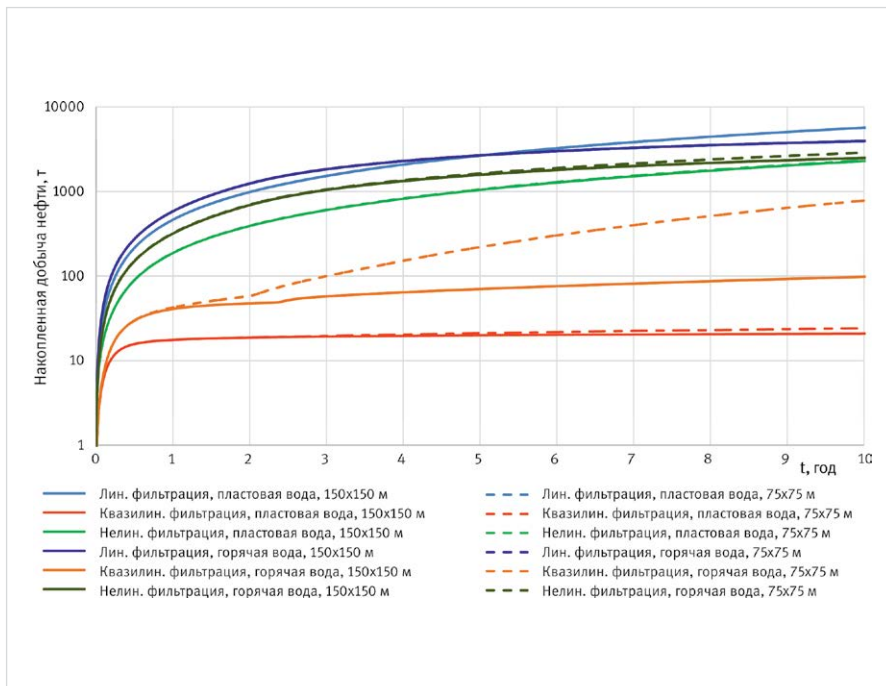


Рис. 3 — Зависимость накопленной добычи нефти от времени для различных вариантов разработки

Fig. 3 — Cumulative oil production to time dependence for different development options

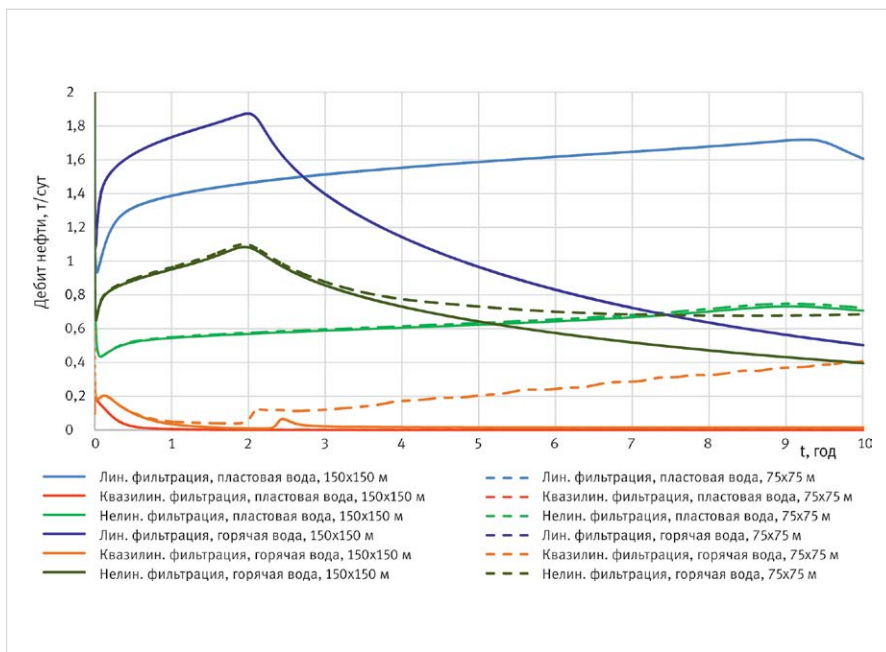


Рис. 4 — Зависимость дебита нефти от времени для различных вариантов разработки

Fig. 4 — Production rate to time dependency for different development options

нефти (и воды) на каждом месторождении, что обуславливает использование керновых исследований для восстановления закона фильтрации. Ввиду того, что зависимость реологических свойств от температуры определяется также проницаемостью образца, необходимо проведение дополнительных исследований зависимости реологии нефти от температуры для низкопроницаемых коллекторов.

Литература

1. Xiong W., Lei Q., Gao S., Hu Z., Xue H. Pseudo threshold pressure gradient to flow for low permeability reservoirs. *Petroleum Exploration*

and Development, 2009, V. 36, pp. 232–236.

2. Ли Сюаньжань. Нелинейная фильтрация воды в низкопроницаемых коллекторах // Вести газовой науки. 2015. № 3. С. 116–121.
3. Wang X., Yang Z., Qi Y., Huang Y. Effect of absorption boundary layer on nonlinear flow in low permeability porous media. *Journal of Central South University of Technology*, 2011, V. 18, pp. 1299–1303.
4. Pang Z.X., Liu H.Q. The transient method and experimental study on threshold pressure gradient of heavy oil in porous media. *Petroleum Engineering Journal*, 2012, V. 5, pp. 7–13.

Research of the effectiveness of thermal treatment of formation with viscoplastic oil

UDC 622.276

Authors:

Yan V. Nevmerzhitskiy — programmer¹; nevmerzhitski_y@mail.ru

Vadim Yu. Semaka — programming engineer¹; semakavadim@gmail.com

Andrey V. Konyukhov — head scientist researcher¹; konyukhov_av@mail.ru

Ivan N. Zav'yalov — scientist researcher¹, senior scientist researcher²; ivenzz@mail.ru

Natal'ya A. Zav'yalova — senior scientist researcher^{1,2}; natalia.zavyalova@gmail.com

Sergey S. Negodyaev — director of Phystech School of Airspace Technologies¹, general director²; snegod@mail.ru

¹Moscow Institute of Physics and Technology

²Oil and gas center MIPT, LLC

Abstract

The article presents modeling software for the efficiency of the thermal oil recovery method (hereinafter – ORM) in formations with viscoplastic oils, and modeling of the options of the low-permeable reservoir production. It reports calculations for three laws of oil filtration, and evaluates the impact of the thermal treatment on the cumulative oil production.

Materials and methods

Thermal oil recovery methods, mathematic modeling

Results

A simulator is designed allowing calculating of the efficiency of the thermal ORM during nonlinear oil filtration. Results are compared to the known analytical and numerical solutions. Efficiency of hot water injection to the formation with non-Newtonian oil is researched.

Conclusions

Numerical modeling results analysis shows that recording of the viscoplastic oil rheology is required when planning both high-viscosity oil field and low-permeable reservoir development.

Obtained results show how important is to determine oil (and water) filtration law at each field, which stipulates applying core surveys to restore the filtration law. Considering that the rheology-temperature dependence is also defined by the sample permeability, additional research is required of the oil rheology-temperature dependence for the low-permeable reservoirs.

Keywords

hard-to-recover reserves, nonlinear filtration, thermal ORM, numerical modeling

References

- Xiong W., Lei Q., Gao S., Hu Z., Xue H. Pseudo threshold pressure gradient to flow for low permeability reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, V. 36, pp. 232–236.
- Li Xuan Zhan. *Nelineynaya fil'tratsiya*

vody v nizkopronitsayemykh kollektorakh [Nonlinear filtration of water in the low-permeable reservoirs]. *Vesti gazovoy nauk*, 2015, issue 3, pp. 116–121.

- Wang X., Yang Z., Qi Y., Huang Y. Effect of absorption boundary layer on nonlinear flow in low permeability porous media.

Journal of Central South University of Technology, 2011, V. 18, pp. 1299–1303.

- Pang Z.X., Liu H.Q. The transient method and experimental study on threshold pressure gradient of heavy oil in porous media. *Petroleum Engineering Journal*, 2012, V. 5, pp. 7–13.

ГЕО 42 ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ ИНКЛИНОМЕТР

ПРОГРЕСС
И Ж Е В С К

Россия, 426008, г. Ижевск, ул. Пушкинская, 268,
тел.: (3412) 43-91-44, факс: (3412) 43-92-63;
E-mail: kashtanov@radio-service.ru

▶ НАЗНАЧЕНИЕ:



Точное измерение координат оси ствола нефтяных, газовых, рудных скважин;



Измерение пространственного положения при строительстве выходов метрополитена, коммуникационных скважин.

▶ ОСОБЕННОСТИ:



Высокая точность ориентирования клина-отклонителя при бурении боковых стволов;



Стойкость к ударным нагрузкам в процессе эксплуатации.