

Оптимизация поиска зон остаточных запасов путем учета неньютоновских свойств нефти при гидродинамическом моделировании

Выломов Д.Д., Штин Н.А.

ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр», Ижевск, Россия
ddvylomov@udmurtneft.ru

Аннотация

Статья посвящена учету нелинейной фильтрации при гидродинамическом моделировании процесса вытеснения нефти. Авторами проанализированы и выявлены основные факторы, являющиеся причинами отклонения от линейного закона фильтрации. В работе рассмотрен метод математического моделирования неньютоновских свойств нефти.

В процессе фильтрационного моделирования реализован и апробирован алгоритм по преобразованию геолого-физических характеристик (ГФХ) нефтяных месторождений в коэффициенты, используемые гидродинамическим симулятором для учета нелинейной фильтрации. Таким образом, построена гидродинамическая модель (ГДМ) нефтяного месторождения, способная учитывать отклонение от линейного закона Дарси и количественно оценивать влияние неньютоновских свойств нефти на процесс разработки.

Материалы и методы

Для расчета предельного динамического напряжения сдвига (ПДС) дегазированной (1) и насыщенной газом нефтью (2) была использована методика, основанная на исследованиях свойств нефтей Волго-Уральской провинции [1].

Ключевые слова

гидродинамическое моделирование, нелинейная фильтрация, отклонение от линейного закона Дарси, неньютоновские свойства нефти, градиент динамического давления сдвига, градиент предельного разрушения структуры, 9-точечная система разработки, остаточные запасы, ГФХ

Для цитирования

Выломов Д.Д., Штин Н.А. Оптимизация поиска зон остаточных запасов путем учета неньютоновских свойств нефти при гидродинамическом моделировании // Экспозиция Нефть Газ. 2021. № 2. С. 57–60. DOI: 10.24412/2076-6785-2021-2-57-60

Поступила в редакцию: 06.10.2020

MINING

UDC 622.276 | Original Paper

Optimization of the search for zones of residual reserves with considering the non-newtonian properties of oil in the process of hydrodynamic modeling

Vylomov D.D., Shtin N.A.

“Izhevsk Petroleum Research Center” CJSC, Izhevsk, Russia
ddvylomov@udmurtneft.ru

Abstract

The paper is devoted to the accounting of nonlinear filtration in hydrodynamic modeling of the oil displacement process. The authors analyzed and identified the main factors that are the reasons for the deviation from the linear filtration law. The work considered a method of mathematical modeling of non-newtonian oil properties.

In the process of filtration modeling, an algorithm for converting the geological-physical characteristics (GPC) of oil fields into coefficients used by a hydrodynamic simulator to take into account nonlinear filtration was created and tested. Thus, a hydrodynamic model (HDM) of an oil field has been built, capable of taking into account the deviation from the linear Darcy's law and quantify the impact of non-newtonian oil properties on the development process.

Materials and methods

To calculate the limit dynamic shear stress (LDSS) of degassed (1) and gas-saturated oil (2), a technique was used based on studies of the properties of oils from the Volga-Ural province [1].

Keywords

hydrodynamic modeling, nonlinear filtering, deviation from linear Darcy's law, non-newtonian properties of oil, gradient of the dynamic structure destruction, gradient of the limit structure destruction, nine point development system of oil, residuals reserves, geological and physical characteristics

For citation

Vylomov D.D., Shtin N.A. Optimization of the search for zones of residual reserves with considering the non-newtonian properties of oil in the process of hydrodynamic modeling. Exposition Oil Gas, 2021, issue 2, P. 57–60. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2021-2-57-60

Received: 06.10.2020

Одной из основных причин возникновения «застойных» недренируемых зон в процессе вытеснения нефти является образование структур, содержащих большое количество асфальтенов, смол, парафинов (АСПО) и серы [2]. Такие структурные образования обладают определенной устойчивостью и требуют определенного перепада давления для начала процесса движения жидкости. Как правило, снижение пластового давления продуктивного пласта в процессе разработки является ключевым фактором для дегазации нефти и выпадения АСПО. Также необходимо отметить влияние техногенного воздействия на пласт при вторичных методах увеличения нефтеотдачи (МУН) — постоянной закачки холодной воды, приводящей к охлаждению пласта и, как следствие, выпадению парафинов, образованию водонефтяных эмульсий, повышению вязкости и плотности нефти [3]. Существует и ряд других причин, влияющих на отклонение от линейного закона Дарси и проявление неньютоновских свойств нефти при низких скоростях фильтрации. Прежде всего, это естественный фактор — низкопроницаемые коллекторы, где проявление неньютоновских свойств особенно усиливается из-за фильтрации жидкости по тонким каналам [4]. Некоторые авторы отмечают особенности проявления неньютоновских свойств при фильтрации вязких нефтей в разных типах коллектора [5]. По результатам экспериментов, проведенных на образцах терригенного и карбонатного керна с примерно одинаковыми значениями пористости и проницаемости, подвижность нефти в карбонатных породах в 2–4 раза ниже, чем в песчаных.

Несмотря на крайне высокую сложность оценки полного влияния нелинейного характера процесса фильтрации, важно учитывать эти данные для более физического и корректного процесса локализации зон остаточных запасов и регулирования системы разработки [6].

Рассмотрим схематическое описание моделирования неньютоновских свойств в гидродинамическом симуляторе «РН-КИМ» [7]. В данном ПО имеется возможность задания отклонения от линейного закона Дарси, определенная кусочной аппроксимацией кривой зависимости скорости фильтрации от градиента давления отрезками прямых (рис. 1).

Для использования ключевого слова и ввода дополнительной таблицы требуется вычисление следующих коэффициентов: градиента динамического давления сдвига (ГДДС — градиент давления, необходимый к преодолению для начала фильтрации жидкости) и градиента предельного разрушения структуры (ГПРС — градиент давления, выше которого фильтрация подчиняется линейному закону Дарси).

Для расчета параметров напряжения сдвига (ПДНС) дегазированной (1) и насыщенной газом нефтью (2) была использована методика, основанная на исследованиях свойств нефтей Волго-Уральской провинции [1]:

$$\Theta_0(T_{пл}, P_{пл}) = K \cdot \frac{A}{C}, \quad (1)$$

где $T_{пл}$, $P_{пл}$ — пластовые температура [°C] и давление [атм]; K — районный коэффициент [б/р]; $\frac{A}{C}$ — отношение процентного содержания смол к асфальтенам [б/р].

$$\Theta(T_{пл}, P_{пл}) = \Theta_0 + \left\{ \left[-0,0516 \cdot \left(\frac{A}{C} \right)^2 + 0,0408 \cdot \frac{A}{C} - 0,0028 \right] \times \left(\Gamma_a^2 + \Gamma_M + \Gamma_\varepsilon \right) \right\}, \quad (2)$$

где Θ_0 — ПДНС дегазированной нефти [атм/м] при $T_{пл}$, $P_{пл}$; Γ_a^2 — квадрат процентного содержания азота [м³/м³]; Γ_M , Γ_ε — процентное содержание метана и этана соответственно [м³/м³].

Далее вычислим ПДНС для давлений (3) и температур (4), отличных от пластовых:

$$\Theta_0(T_{пл}, P) = \Theta \cdot \left(\frac{5 - \lg P}{3} \right), \quad (3)$$

где Θ — ПДНС насыщенной газом нефти [атм/м] при $T_{пл}$, $P_{пл}$; P — величина давления не равная пластовому [атм].

$$\Theta_T(T, P_{пл}) = \Theta \cdot \left(\frac{24}{T} - 0,04 \right), \quad (4)$$

где T — величина температуры не равной пластовой [°C].

При использовании полученных ранее формул рассчитаем величины искоемых для моделирования нелинейной фильтрации градиентов ГДДС (5) и ГПРС (6):

$$H_0(T_{пл}, P_{пл}) = \frac{0,052}{k \cdot 0,62} \cdot \Theta, \quad (5)$$

где k_n — проницаемость [мД].

$$H_L(T_{пл}, P_{пл}) = 0,0078 + 1,21 \cdot H_0, \quad (6)$$

где H_0 — ГДДС [атм/м].

Согласно отраженной ранее последовательности расчета искоемых коэффициентов, используем уравнения (1) и (2) для преобразования исходных ГФХ месторождения в значения коэффициента ПДНС.

На основании расчетных величин ПДНС рассчитаем значения ГДДС и ГПРС для разных значений абсолютной проницаемости, а также отобразим полученные зависимости скорости фильтрации от граничных градиентов на графике (рис. 2).

Полученные зависимости скорости фильтрации от граничных градиентов подтверждают экспериментальные данные об обратном влиянии проницаемости пород на реологические параметры [8], что в свою очередь свидетельствует о физичности и корректности предлагаемого авторами алгоритма по определению граничных градиентов и моделированию неньютоновских свойств нефти.

Для учета влияния нелинейной фильтрации и локализации зон остаточных запасов была использована секторная гидродинамическая модель нефтяной залежи, обладающая следующими свойствами: средняя пористость

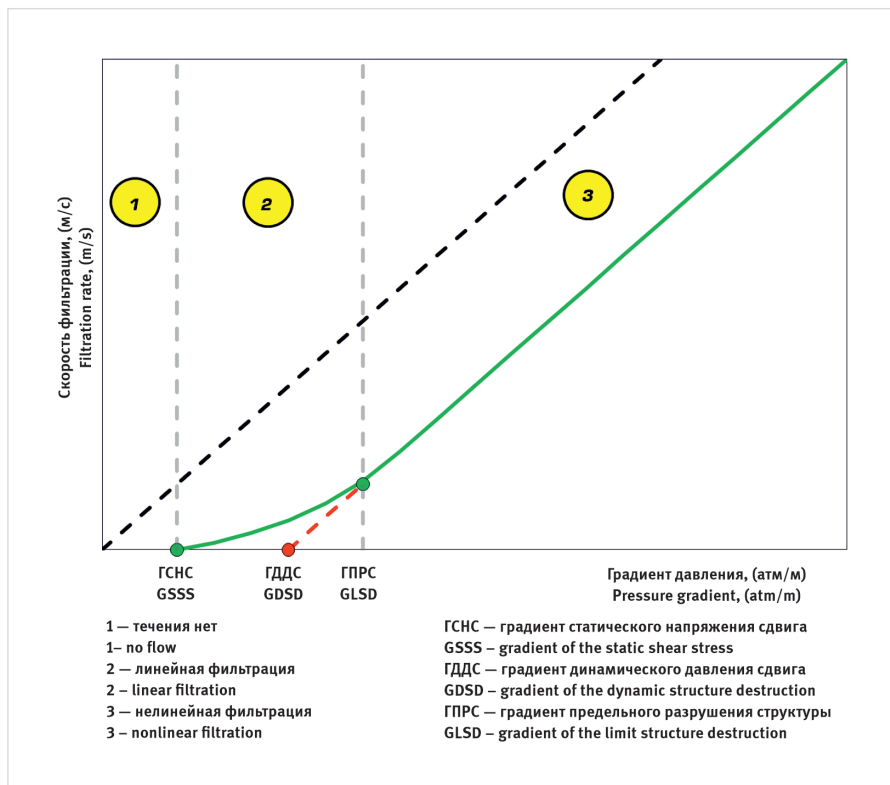


Рис. 1. Кусочная аппроксимация кривой зависимости скорости фильтрации от градиента давления отрезками прямых
Fig. 1. Partial approximation of the curve of the dependence of the filtration rate on the pressure gradient by line intervals

0.15 д. ед., средняя проницаемость 30 мД, вязкость нефти 20 сПз и начальные геологические запасы (НГЗ) нефти 5 млн т.

После этапа инициализации ГДМ в контуре залежи было размещено несколько элементов девятиточечной системы разработки и произведена серия расчетов по запуску добывающих и нагнетательных скважин, в ходе которых пластовое давление опускалось ниже давления насыщения.

В процессе работы было проведено два типа расчетов: с учетом неьютоновских свойств нефти, то есть при использовании ключевого слова и таблицы зависимости граничных градиентов от проницаемости, и без учета.

Финальным результатом расчетов стала карта разницы остаточных подвижных запасов нефти для двух ГДМ (учитывающей и не учитывающей отклонение от линейного закона Дарси) (рис. 3).

Разница в накопленной добыче нефти без учета и с учетом неьютоновских свойств нефти составила 85 тыс. т или 6 % (табл. 1), что подтверждает значительное влияние реологических свойств жидкости на нефтеотдачу даже для среднепроницаемых коллекторов с повышенной вязкостью.

Итоги

В работе рассмотрены основные факторы, способствующие возникновению неьютоновских свойств нефти при разработке нефтяных месторождений. По аналитическим формулам получены зависимости скорости фильтрации от граничных градиентов. Предоставлено описание моделирования неьютоновских свойств в гидродинамическом симуляторе. На гидродинамической модели показан эффект изменения подвижных запасов нефти при расчете с отклонением от линейного закона Дарси.

Табл. 1. Численная разница моделирования
Tab. 1. Numerical simulation difference

Накопленная добыча нефти (на конец расчета)		Разница	
без учета, тыс. т	с учетом, тыс. т	относительная, %	абсолютная, тыс. т
1 506	1 421	-6	-85

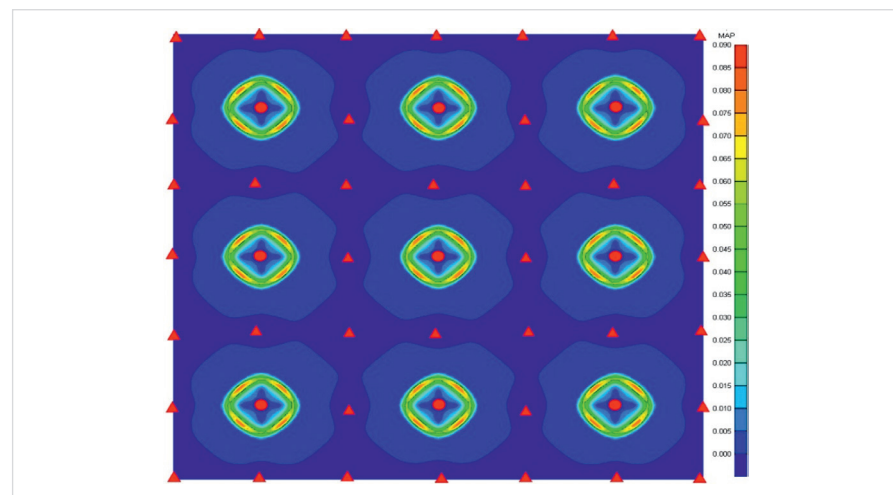


Рис. 3. Карта разницы остаточных подвижных запасов нефти без учета и с учетом нелинейной фильтрации, т/м²

Fig. 3. Map of the difference in movable mobile oil reserves without and add option nonlinear filtration, t/m²

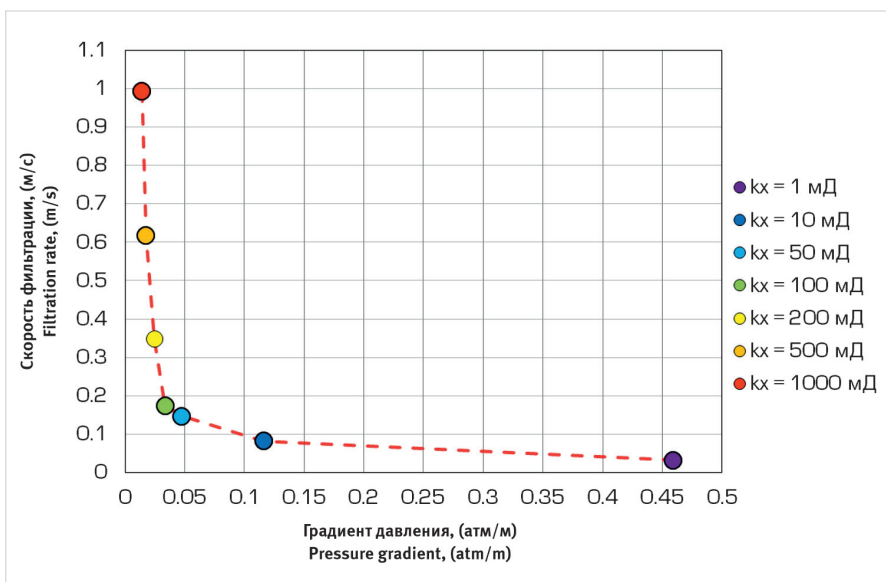


Рис. 2. Зависимость скорости фильтрации от граничных градиентов при разных величинах абсолютной проницаемости

Fig. 2. Correlation of filtration rate on limit gradients at different values of absolute permeability

Выводы

Из-за снижения пластового давления и последующего увеличения вязкости нефти в прискважинной зоне формируется ограниченная недеренируемая область со значениями градиента давления ниже ГДДС. Такие «застойные» зоны практически не вовлечены в процесс разработки, что приводит к снижению фактического коэффициента нефтеизвлечения (КИН). Увеличение ГДДС и ГПРС обуславливает уменьшение проницаемости и, как следствие, снижает скорость фильтрации. Учет влияния неьютоновских свойств

нефти при гидродинамическом моделировании позволяет выявлять области, не вовлеченные в процесс разработки, и оценивать их остаточные запасы.

Литература

1. Девликамов В.В., Хабибуллин З.А., Кабиров М.М. Аномальные нефти. М.: Недра, 1975. 168 с.
2. Рузин Л.М., Морозюк О.А., Дуркин С.М., Жангабылов Р.А., Калинин С.А. Особенности разработки залежей высоковязкой нефти // Нефтегазовое дело. 2015. Т. 13. № 2. С. 58–67.
3. Ханипов М.Н., Насыбуллин А.В., Саттаров Рав.З., Саттаров Рам.З. Исследование влияния неьютоновских свойств нефти на выработку запасов с применением гидродинамического моделирования // Нефтяное хозяйство. 2017. № 12. С. 114–116.
4. Берлин А.В., Миронычев В.Г., Васильев В.Г., Зубов Н.В., Дерюшев Д.Е., Юдин В.А. Учет неьютоновских свойств нефти при гидродинамическом моделировании // Нефтяное хозяйство. 2004. № 12. С. 46–49.
5. Гафаров Ш.А., Шамаев Г.А., Сафонов Е.Н. Особенности фильтрации неьютоновских нефтей в карбонатных пористых средах // Нефтяное хозяйство. 2005. № 11. С. 52–54.
6. Подъячева В.Е., Ковалев А.А., Зиновьев А.М., Ильин И.В. К вопросу формирования системы разработки залежи, содержащей вязкопластичную неьютоновскую нефть // Нефтепромысловое дело. 2017. № 3. С. 5–8.
7. Гидродинамический симулятор залежей углеводородов. ПАО «НК «Роснефть». «РН-КИМ». Уфа, 2020.
8. Рахимов Н.Р., Оруджев В.Л. Особенности разработки и эксплуатации месторождений неьютоновских нефтей. Ташкент: Фан, 1976.

Results

The paper considers the main factors contributing to the emergence of non-newtonian properties of oil in the development of oil fields. According to analytical formulas, the dependences of the filtration rate on the boundary gradients are obtained. A description of modeling non-Newtonian properties in a hydrodynamic simulator is provided. On the hydrodynamic model, the effect of changes in mobile oil reserves is shown when calculating with a deviation from the linear Darcy's law.

References

1. Devlikamov V.V., Habibullin Z.A., Kabirov M.M. Abnormal oils. M.: Nedra, 1975. (In Russ).
2. Ruzin L.M., Morozyuk O.A., Durkin S.M., Jangabylov R.A., Kalinin S.A. Features high-viscosity oil reservoir development. Oil Industry, 2015, T. 13, issue 2, P. 58-67. (In Russ).
3. Hanipov M.N., Nasybullin A.V., Sattarov Rav.Z., Sattarov Ram.Z. Reservoir simulation modeling used to assess the effect of non-newtonian oil properties

- on reserves recovery. Oil Industry, 2017, issue 12, P. 114-116. (In Russ).
4. Berlin A.V., Mironichev V.G., Vasilyev V.G., Zubov N.V., Deryushev D.E., Yudin V.A. Non-newtonian oils filtration features in carbonate porous medium // Oil Industry, 2004, issue 2, P. 46-49. (In Russ).
5. Gafarov Sh.A., Shamayev G.A., Safonov E.N. Features filtration of non-Newton oils in carbonate porous environments // Oil Industry, 2005, issue 11, P. 52-54. (In Russ).
6. Podyacheva V.E., Kovalev A.A.,

Conclusions

If the linearity of the filtration law is violated, a limited non-drainable area is formed around the wells with pressure gradient values below the GDSD. Such "stagnant" zones are practically not involved in the filtration process, which leads to a decrease in the actual oil recovery factor (ORF). The increase in GDSD and GLSD is due to a decrease in permeability, and, as a consequence, decreases the filtration rate. Taking into account the influence of non-Newtonian oil properties in hydrodynamic modeling allows identifying areas that are not involved in the development process and assessing their residual reserves.

- Zinoviev A.M., Ilyin I.V. Some aspects of formation of a deposit development system containing viscous-plastic non-newtonian oil. Oil Industry, 2017, issue 3, P. 5-8. (In Russ).
7. Hydrodynamic reservoir simulator. Rosneft Oil Company, PJSC, "RN-KIM", Ufa, 2020. (In Russ).
8. Rakhimov N.R., Orujev V.L. Peculiarities of development and operation of non-Newtonian oil fields. Tashkent: Fan, 1976. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виломов Денис Дмитриевич, ведущий инженер,
ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр», Ижевск, Россия
Для контактов: ddvylomov@udmurtneft.ru

Штин Никита Александрович, главный специалист,
ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр», Ижевск, Россия

Vylomov Denis Dmitrievich, lead engineer,
"Petroleum research center" CJSC, Izhevsk, Russia
Corresponding author: ddvylomov@udmurtneft.ru

Shtin Nikita Aleksandrovich, chief specialist,
"Petroleum research center" CJSC, Izhevsk, Russia

ООО «Выставочная компания
Сибэкспосервис»



Якутск – Одиннадцатая межрегиональная специализированная выставка САХАПРОМЭКСПО – 2021

Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений.
Оборудование для бурения, строительства скважин и трубопроводов,
добычи нефти и газа. Новые технологии и оборудование хранения,
транспорта, переработки и распределения природного газа и нефти

ЯКУТСК, 27 – 28 октября

Тел.: (383) 335-63-50
e-mail: vk ses@yandex.ru
www.ses.net.ru

**ЭКСПОЗИЦИЯ
НЕФТЬ ГАЗ**

Генеральный информационный партнер