ИНДИКАТОРНАЯ КРИВАЯ ДЛЯ СЛУЧАЯ ТРЕХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ЗАБОЙНОМ ДАВЛЕНИИ НИЖЕ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕНИЯ

THE INFLOW PERFORMANCE RELATIONSHIP FOR THE THREE-PHASE FLOW

М. Н. Харисов
M. N. Kharisov

Уфимский государственный
авиационный технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Aviation
Technical University,
Ufa, Russian Federation

Р. А. Майский
R. A. Maiski

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Э. А. Юнусова
E. A. Yunusova

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

С. Б. Будю
S. B. Budo

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Э. А. Харисова
E. A. Kharisova

Уфимский государственный
авиационный технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Aviation
Technical University,
Ufa, Russian Federation

Прогнозирование технологических показателей геолого-технических мероприятий является важным этапом процесса рациональной разработки месторождений углеводородного сырья. Индикаторная диаграмма Вогеля, получившая широкое применение в качестве инструмента для оценки потенциального прироста дебита нефти в результате проведения геолого-технических мероприятий при забойном давлении ниже давления насыщения, ограничена в применении условием наличия двухфазной фильтрации нефти и выделившегося растворенного газа. С целью повышения качества прогноза при водонапорных режимах разработки для месторождений углеводородного сырья авторами определена эмпирическая корреляционная зависимость для случая трехфазной фильтрации при забойном давлении ниже давления насыщения. Полученная индикаторная кривая позволяет повысить эффективность определения технологических показателей геолого-технических мероприятий и, соответственно, снизить неопределенности и риски при разработке месторождений углеводородного сырья.

The forecasting of production rates of well interventions is an important stage of the optimal oilfield development. Vogel's inflow performance relationship, that is widely used to assess the potential oil production at the bottom-hole pressure below the bubblepoint pressure, can be applied only for solution-gas drive reservoirs. In order to increase the prediction quality in case of water drive reservoirs, an empirical correlation for the three-phase flow at the bottom-hole pressure below the bubblepoint pressure was determined. The proposed inflow performance relationship can increase the efficiency of the prediction of well interventions production rates, and reduce uncertainties and risks related to the oilfield development.

Ключевые слова

прогнозирование
дебита нефти,
индикаторная
кривая Вогеля,
месторождение
углеводородного
сырья,
давление насыщения,
трехфазный приток

Key words

prediction of oil
production rates,
Vogel's inflow
performance relationship,
oil reservoir, saturation
pressure,
three-phase flow

Введение

Одним из основных инструментов, используемых для оперативной оценки дебита нефти на скважинах месторождений углеводородного сырья (УВС), является индикаторная диаграмма. На основании ее анализа проводятся определение оптимальной системы разработки, подбор скважинного оборудования, выработка рекомендаций по геолого-техническим мероприятиям, а также прогноз технологических показателей месторождений для целей планирования. Каждый из перечисленных пунктов является частью интегрального процесса рациональной эксплуатации скважин в частном и успешного управления разработкой месторождений УВС в целом [1, 2].

Представленная Вогелем эмпирическая индикаторная кривая (ИК) для скважин с двухфазной фильтрацией нефти и выделившегося растворенного газа, основанная на результатах синтетического компьютерного моделирования, получила широкое применение в нефтяной индустрии [3]. Она позволяет значительно сократить временные и ресурсные затраты на вычисления технологических показателей разработки по сравнению с геолого-гидродинамическим моделированием (ГГДМ) и значительно повысить точность расчетов по сравнению с применением формулы Дюпюи [4, 5].

Сделанные Вогелем выводы о том, что на характер искривления полученной зависимости не влияют такие показатели, как стадия разработки, система разработки и абсолют-

ная проницаемость коллектора, упростили задачу определения единой индикаторной диаграммы для месторождений УВС со схожими геолого-физическими характеристиками [5].

Однако для эффективного использования индикаторной кривой в производственных процессах компаний нефтяной индустрии требуется проведение дополнительного численного анализа, позволяющего устранить имеющиеся в ней недостатки [5, 6]:

- возможность применения только для случая фильтрации нефтяной фазы с выделением растворенного газа;
- зависимость результатов применения от физико-химических свойств пластовых флюидов;
- отсутствие учета совокупного скин-фактора, возникающего при повреждении или стимуляции призабойной зоны коллектора.

Анализ результатов применения индикаторной кривой Вогеля

Результаты геолого-гидродинамического моделирования трехфазного притока к скважине воды, нефти и выделившегося растворенного газа при забойном давлении ниже давления насыщения были сопоставлены с результатами, полученным при расчете с применением индикаторной кривой Вогеля. По данным сопоставления заметно существенное отклонение значений, рассчитанных с использованием зависимости Вогеля, от значений, полученных в ходе геолого-гидродинамического моделирования (рисунок 1).

Рисунок 1. Сравнение результатов геолого-гидродинамического моделирования с результатами вычислений с использованием зависимости Вогеля

Среднее относительное отклонение значений составило 10 %, в то время как максимальное отклонение превысило 16 %. Полученные результаты позволяют сделать вывод об актуальности определения индикаторной кривой для случая трехфазной фильтрации при забойном давлении ниже давления насыщения с учетом особенностей месторождений УВС с целью повышения точности определения технологических показателей разработки.

Определение индикаторной кривой для случая трехфазной фильтрации при забойном давлении ниже давления насыщения

В целях устранения выявленных в корреляции Вогеля недостатков был воспроизведен алгоритм определения эмпирической индикаторной кривой при забойном давлении ниже давления насыщения (рисунок 2) [5]. Для анализа были выбраны скважины с трехфазным притоком нефти, воды и выделившегося растворенного газа.

Геолого-гидродинамическое моделирование проводилось на синтетической модели при различных значениях физико-химических свойств пластовых флюидов и фильтраци-

онно-емкостных свойств коллектора. Комбинации значений варьируемых параметров определялись методом группы Монте-Карло [7] на основании их плотности распределения вероятности [8]. Стандартизованные результаты, полученные в ходе моделирования, представлены на рисунке 3.

При помощи корреляционно-регрессионного анализа была выявлена эмпирическая кривая, описывающая зависимость приведенного забойного давления на наклонно-направленной скважине от потенциального приведенного дебита нефти для случая радиального псевдоустановившегося трехфазного притока, которая представляет собой полином второй степени:

$$\frac{q_o}{(q_o)_{max}} = 1 - 0,46 \left(\frac{P_{wf}'}{\bar{P}_r} \right) - 0,54 \left(\frac{P_{wf}'}{\bar{P}_r} \right)^2,$$

где q_o — дебит нефти скважины; $q_{o_{max}}$ — максимально возможный дебит нефти скважины; $\bar{P}_r$ — среднее давление на радиусе контура питания; P_{wf}' — забойное давление стимулированной скважины.

Рисунок 2. Алгоритм определения эмпирической индикаторной кривой при забойном давлении ниже давления насыщения

Для учета совокупного скин-фактора забойное давление поврежденной или стимулированной скважины определяется по формуле [5, 9]:

$$P_{wf}' = \overline{P}_R - FE(\overline{P}_R - P_{wf}),$$

где P_{wf} — забойное давление скважины; FE — фактор эффективности притока.

Из рисунка 4 видно, что отклонения значений, полученных в результате геолого-гидродинамического моделирования, от предложенной индикаторной кривой несущественно, в

то время как корреляция Вогеля не способна адекватно описать ни одну зависимость из анализируемого множества.

Результаты апробации предложенной индикаторной диаграммы приведены на рисунке 5.

Среднее относительное отклонение значений, рассчитанных по предложенной зависимости, от значений, полученных в результате геолого-гидродинамического моделирования, составило 3 %, при этом максимальное отклонение не превышало 5 %.

Рисунок 3. Результаты геолого-гидродинамического моделирования трехфазного притока к скважине на синтетических моделях с различными параметрами

Рисунок 4. Сравнение результатов геолого-гидродинамического моделирования с результатами вычислений по предложенной индикаторной кривой и с результатами вычислений с использованием зависимости Вогеля

Рисунок 5. Сравнение результатов компьютерного моделирования с использованием синтетической гидродинамической модели со значениями, рассчитанными по альтернативной зависимости

Выводы

В рамках данной работы в результате геолого-гидродинамического моделирования с использованием синтетических моделей были получены индикаторные кривые для различных значений физико-химических свойств флюидов и фильтрационно-емкостных свойств коллектора месторождений углеводородного сырья. Анализ полученных кривых показал их значительное отклонение от предложенной Вогелем индикаторной диаграммы.

Методом корреляционно-регрессионного анализа семейства кривых была определена альтернативная индикаторная диаграмма для случая трехфазной фильтрации при забойном давлении ниже давления насыщения.

По результатам практической апробации было выявлено значительное повышение качества расчетов дебита нефти при использо-

вании предложенной эмпирической зависимости по сравнению со случаем применения корреляции Вогеля. Среднее относительное отклонение значений, рассчитанных с использованием индикаторной диаграммы, от значений, полученных в результате геолого-гидродинамического моделирования, снизилось с 10 % (в случае применения зависимости Вогеля) до 3 % (в случае применения альтернативной индикаторной кривой). Максимальное отклонение снизилось, соответственно, с 16 % до 5 %.

Таким образом, предложенная индикаторная кривая способна повысить точность определения технологических показателей для случая трехфазной фильтрации при забойном давлении ниже давления насыщения для месторождений углеводородного сырья, а также снизить неопределенности и риски при их рациональной разработке.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Деева Т.А., Камартдинов М.Р., Кулагина Т.Е., Шевелев П.В., Кагарманов И.И., Мельников А.П. Современные методы разработки месторождений на поздних стадиях. Томск, 2009. 244 с.
2. Лысенко В.Д., Грайфер В.И. Рациональная разработка нефтяных месторождений. М.: Недра, 2005. 607 с.
3. Каневская Р.Д. Математическое моделирование гидромеханических процессов разработки месторождений углеводородов / Институт компьютерных исследований. М.-Ижевск, 2002. 140 с.
4. Юнусова Э.А. Информационно-аналитическая система прогнозирования технологических пока-

- зателей разработки месторождений углеводородного сырья // Сб. тез. докл. VII Науч.-техн. конф. молодых специалистов ООО «БашНИПИнефть» (Уфа, 15–17 февраля 2017 г.). Уфа: БашНИПИнефть, 2017. С. 68–69.
5. Юнусова Э.А., Майский Р.А., Харисов М.Н., Юнусова Г.Ф. Анализ эффективности применения индикаторной кривой Вогеля при прогнозировании дебита нефти // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Вып. 2 (108). С. 23–31.
6. Vogel J.V. et al. Inflow Performance Relationships for Solution-Gas Drive Wells // Journal of Petroleum Technology. 1968. Vol. 20. No. 01. P. 83–92.
7. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo Method // Journal of the American Statistical Association. 1949. Vol. 44. No. 247. P. 335–341.

8. Ширяев А.Н. Вероятность. 1980. 576 с.
9. Standing M.B. et al. Inflow Performance Relationships for Damaged Wells Producing by Solution-Gas Drive // *Journal of Petroleum Technology*. 1970. Vol. 22. No. 11. P. 1.399–1.400.

REFERENCES

1. Deeva T.A., Kamartdinov M.R., Kulagina T.E., Shevelev P.V., Kagarmanov I.I., Mel'nikov A.P. *Sovremennye metody razrabotki mestorozhdenii na pozdnykh stadiyakh* [Modern Methods of Deposits Developing at Late Stages]. Tomsk, 2009. 244 p. [in Russian].
2. Lysenko V.D., Graifer V.I. *Ratsional'naya razrabotka neftyanykh mestorozhdenii* [Rational Development of Oil Fields]. Moscow, Nedra Publ., 2005. 607 p. [in Russian].
3. Kanevskaya R.D. *Matematicheskoe modelirovanie gidromekhanicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov* [Mathematical Modeling of Hydromechanical Processes of Hydrocarbon Deposits Development]. Moscow-Izhevsk, 2002. 140 p. [in Russian].
4. Yunusova E.A. Informatsionno-analiticheskaya sistema prognozirovaniya tekhnologicheskikh pokazatelei razrabotki mestorozhdenii uglevodorodnogo syr'ya [Information-Analytical System for Forecasting Technological Indicators of Hydrocarbon Deposits Development]. *Sbornik tezisev dokladov VII Nauchno-*

tekhnicheskoy konferentsii molodykh spetsialistov OOO «BashNIPIneft'» (Ufa, 15-17 fevralya 2017 g.) [Collection of Thesis of VII Scientific and Technical Conference of Young Specialists of OOO «BashNIPIneft'» (Ufa, February, 15-17, 2017)]. Ufa, BashNIPIneft', 2017. P. 68–69. [in Russian].

5. Yunusova E.A., Maiskii R.A., Kharisov M.N., Yunusova G.F. Analiz effektivnosti primeneniya indikatornoi krivoi Vogelya pri prognozirovanii debita nefii [Analysis of Application Efficiency of Vogel's Inflow Performance Relationship for Forecasting of Oil Production Rate]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefii i nefteproduktov — Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2017, Issue 2 (108), pp. 23–31. [in Russian].
6. Vogel J.V. et al. Inflow Performance Relationships for Solution-Gas Drive Wells. *Journal of Petroleum Technology*, 1968, Vol. 20, No. 01, pp. 83–92.
7. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*, 1949, Vol. 44, No. 247, pp. 335–341.
8. Shiryaev A.N. Veroyatnost' [Probability]. 1980. 576 p. [in Russian].
9. Standing M.B. et al. Inflow Performance Relationships for Damaged Wells Producing by Solution-Gas Drive. *Journal of Petroleum Technology*, 1970, Vol. 22, No. 11, P. 1.399–1.400.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Харисов М. Н., кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная математика и кибернетика», ФГБОУ ВО «УГТУ», г. Уфа, Российская Федерация

M. N. Kharisov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Computational Mathematics and Cybernetics Department, FSBEI HE «USATU», Ufa, Russian Federation

e-mail: kharisov-usatu@yandex.ru

Юнусова Э. А., магистрант кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газонефтяных месторождений», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

E. A. Yunusova, Undergraduate Student of Oil and Gas Fields Design and Exploitation Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: elenalikovna@gmail.ru

Харисова Э. А., старший преподаватель кафедры «Вычислительная математика и кибернетика», ФГБОУ ВО «УГТУ», г. Уфа, Российская Федерация

E. A. Kharisova, Senior Lecturer of Computational Mathematics and Cybernetics Department, FSBEI HE «USATU», Ufa, Russian Federation

e-mail: ekharisova@yandex.ru

Майский Р. А., кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

R. A. Maiski, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Mathematics Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: ravanmay@yandex.ru

Будо С. Б., ассистент кафедры «Математика», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

S. B. Budo, Assistant of Mathematics Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: s.budo@mail.ru