



ПОВЫШЕНИЕ КОНДЕНСАТООТДАЧИ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ НА ЗАВЕРШАЮЩЕЙ СТАДИИ РАЗРАБОТКИ

М.С.Халилов

Бакинский Государственный Университет, Баку, Азербайджан

Increase of Condensation for Gas-Condensate Discharges at the Finishing Stage of Development

M.S.Khalilov

Baku State University, Baku, Azerbaijan

Abstract

Based on a two-phase multicomponent filtration model, the process of retrograde condensate extraction at the final stage of the development of a gas-condensate reservoir was investigated, with the creation of a volume of ethane rims in the reservoir with subsequent injection of the separated gas. It has been established that ethane dissolves in a retrograde condensate during continuous mass exchange between the phases of the system, creates a shaft of liquid hydrocarbons higher than critical at the front of displacement, at which two-phase filtration begins, which allows for the development of reserves of retrograde hydrocarbon condensate and, ultimately, provides effective reservoir development.

Keywords:

Depletion mode;
Injection of ethane and separated gas;
Retrograde condensate;
Volume of ethane rim;
Pressure below maximum condensation.

© 2020 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Разработка газоконденсатных месторождений на истощение приводит к потерям в недрах месторождений огромного количества ценного углеводородного сырья, особенно высококипящих углеводородов. Поэтому не имеем возможности достичь высоких коэффициентов извлечения из пласта жидких углеводородов.

Количество выпадающей в пласте жидкой фазы увеличивается, пока пластовое давление не снижается до давления максимальной конденсации. В соответствии с закономерностями фазового поведения при дальнейшем снижении давления должно происходить испарение ранее выпавшей углеводородной жидкости. Однако поведение реальных газоконденсатных смесей в пласте на завершающей стадии разработки газоконденсатных месторождений свидетельствует о том, что в силу гистерезисных явлений жидкая углеводородная фаза испаряется в количествах, меньших ожидаемых равновесных величин.

Термодинамические расчеты [1-4] показывают, что путем изменения количества этана в смеси можно управлять распределением C_{5+} между фазами. В [1-4] показано, что при разных давлениях содержание этана в смеси заметно влияет на распределение фракции C_{5+} между

газовой и жидкой фазой. При давлениях, близких к давлению начала конденсации, повышенное содержание этана в смеси ведет к увеличению количества C_{5+} в газовой фазе. В области средних давлений повышение содержания этана в смеси несущественно оказывает влияние на переход фракции C_{5+} в газовую фазу. При давлениях ниже давления максимальной конденсации повышение содержания этана в смеси не ведет к увеличению количества C_{5+} в газе, а с другой стороны, объем ретроградного конденсата является значительным, то возможно все же перевести на подвижное состояние ретроградного конденсата.

Особенностью физических свойств этана является то, что при типичных пластовых давлениях любой, в том числе и завершающей стадии разработки газоконденсатных месторождений, константы фазового равновесия этана близки к единице независимо от значения давления схождения. Это особенность проявляется в процессе разработки газоконденсатных месторождений на истощение, в частности, в том, что содержание этана в пластовом газе и продукции промысла почти не изменяется за весь период разработки.

Свойства этана обеспечивают достаточно высокую эффективность вытеснения выпавшего конденсата при использовании его в качестве растворителя. Оторочка этана в условиях истощенной газоконденсатной залежи неограниченно

смешивается как с пластовой газовой, так и жидкой фазой.

В рамках развития изложенных идей процесс последовательного нагнетания этана и сепарированного газа в газоконденсатную залежь на завершающей стадии разработки (при интервале давлений ниже давления максимальной конденсации) был исследован на основе многокомпонентной двухфазной модели фильтрации [5]

$$\begin{aligned} \nabla \left[\left(\frac{k h f_l(s_l) \rho_l}{\mu_l M_l} x_i \nabla p_l + \frac{k h f_g(s_g) \rho_g}{\mu_g M_g} y_i \nabla p_g \right) \right] = \\ = \frac{\partial}{\partial t} \left[m h \left(\frac{\rho_l s_l}{M_l} + \frac{\rho_g s_g}{M_g} \right) z_i \right] \pm \\ \pm \sum_{v=1}^n Q_i^v(t) \delta(x - x_v) \delta(y - y_v) \end{aligned} \quad (1)$$

$$i = \overline{1, N}, (x, y) \in D, t \in (0, T), \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N y_i = 1, \sum_{i=1}^N z_i = 1,$$

при соответствующих начальных и граничных условиях:

$$p_g(x, y, t) \Big|_{t=0} = p_{g0}(x, y), (x, y) \in D \quad (2)$$

$$z_i(x, y, t) \Big|_{t=0} = z_i^0(x, y), i = 1, 2, \dots, N, (x, y) \in D \quad (3)$$

$$\frac{\partial p_g(x, y, t)}{\partial n} \Big|_{\Omega} = 0, (x, y) \in \Omega, t \in (0, T) \quad (4)$$

где $f_g(s_g)$ и $f_l(s_l)$ - относительная фазовая проницаемость, для газовой и жидкой фаз;

s_g и s_l - коэффициент насыщенности пористой среды, паровой и жидкой фазы;

p_g, p_l - давление паровой и жидкой фазы;
 t - время;

x_i, y_i - молярные содержания i -го компонента в жидкой и газобразной фазах;

z_i - суммарное молярное содержание i -го компонента в смеси;

ρ_g и ρ_l - молярная плотность газобразной и жидкой фазы;

M_l и M_g - соответственно средние молекулярные веса жидкой и газовой фазы;

$\delta(\cdot)$ - функция Дирака;

$Q_i^v(t)$ - плотность v -го источника (стока) по i -му компоненту в момент времени t ;

x_v, y_v - координаты v -го элементарного источника (стока);

n - число элементарных источников (стоков).

Учитываемые капиллярные силы и связь между давлениями в фазах выражаются через капиллярные давления на границах раздела углеводородный газ-жидкость:

$$p_l = p_g - p_{clg} \quad (5)$$

где p_{clg} - капиллярное давление на контакте газ-жидкость.

При выполнении условия существования локального термодинамического равновесия система уравнений (1)-(5) замыкается следующими соотношениями:

$$\rho_g = \rho_g(p_g, T, z_1, z_2, \dots, z_{N-1}, z_N),$$

$$\rho_l = \rho_l(p_l, T, z_1, z_2, \dots, z_{N-1}, z_N),$$

$$\mu_g = \mu_g(p_g, T, z_1, z_2, \dots, z_{N-1}, z_N),$$

$$\mu_l = \mu_l(p_l, T, z_1, z_2, \dots, z_{N-1}, z_N),$$

$$s_g = 1 - s_l, \quad s_l = \frac{L \rho_g M_l}{L \rho_g M_l + V \rho_l M_g} \quad (6)$$

где V, L - молярные доли газовой и жидкой фазы.

Свойства газобразной и жидкой фазы (6), необходимые при решении системы уравнений (1)-(2), определяются из системы [6]:

$$\begin{cases} f_{i,l} - f_{i,g} = 0, i = \overline{1, N} \\ x_i L + y_i V - z_i = 0, i = \overline{1, N} \\ \sum_{i=1}^N y_i - 1 = 0 \\ L + V = 1 \end{cases} \quad (7)$$

В системе (7) первые N уравнений описывают условия термодинамического равновесия в паровой и жидкой фазах. Летучести компонентов рассчитываются на основе известных термодинамических соотношений с использованием уравнений состояния фаз [6].

Для численной реализации решения задач (1)-(7) был использован метод «неявные по давлению, явные по доли компонентов», который подробно описан в [7]. На основе изложенного алгоритма были проведены численные расчеты, и на примере VII горизонта газоконденсатного месторождения «Булла-дениз» выполнено прогнозирование технологических показателей разработки.

Отметим некоторые особенности VII горизонта. Начальное пластовое давление - свыше 71 МПа. Температура залежи составляла 102 °С, давление начала конденсации пластовой углеводородной смеси приблизительно 71 МПа. Молекулярная масса конденсата - 160, конденсатосодержание газовой фазы 362 г/м³. Пористость коллекторов составляет 16.9% и проницаемость 0.042 мкм².

Пластовая газоконденсатная смесь исследуемого объекта характеризовалась следующим начальным усредненным составом (молярная доля, %): метан - 88.59; этан - 4.11; пропан - 1.47; бутан - 0.77; C₅₊ - 4.86; углекислый газ - 0.2.

На рисунке 1 показана структурная карта VII горизонта. Текущие дебиты газа и конденсата исследуемого объекта по скважинам взяты из [8]. Физические свойства фаз и доли компонентов в каждой фазе определены из системы (7) с использованием уравнения состояния [6], исходя из компонентного состава смеси при текущих давлениях и температурах. Изменение этих данных в процессе истощения залежи представлены в таблице 1. Относительные фазовые проницаемости газа и конденсата были получены путем адаптации гидродинамической модели по данным истории разработки этой залежи в режиме

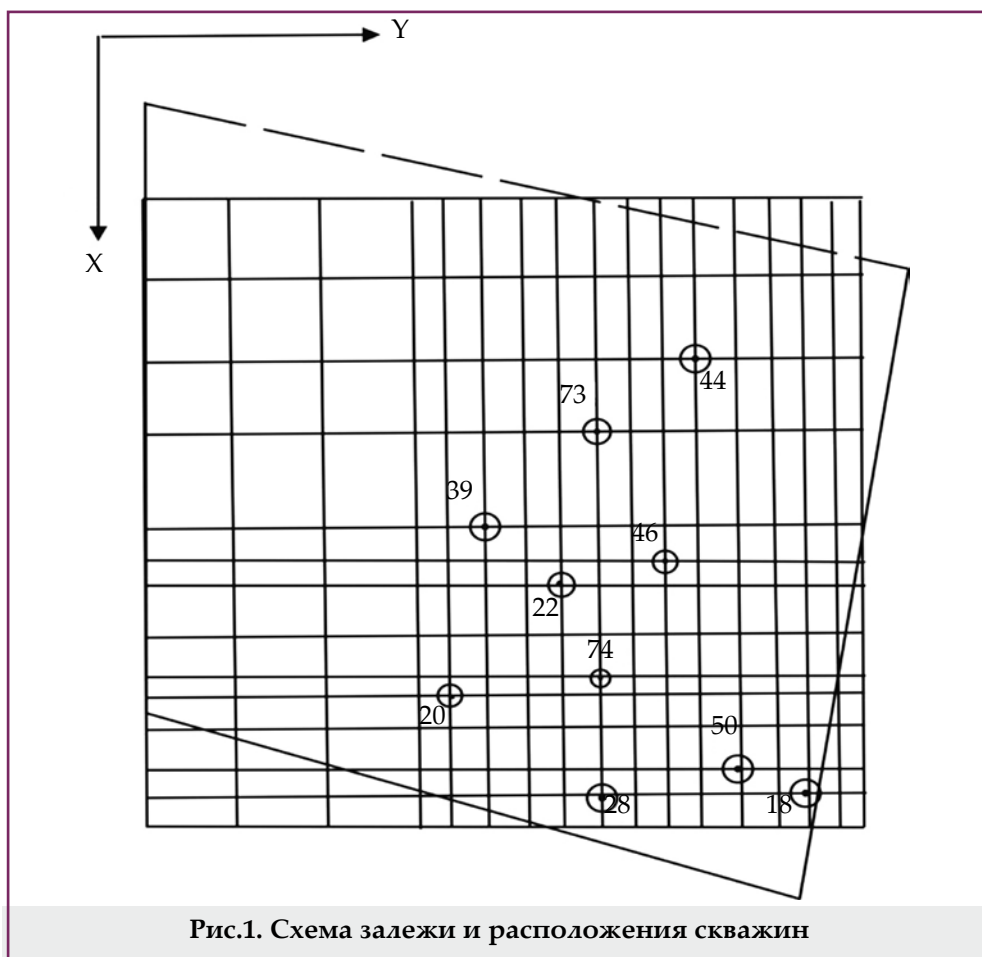


Таблица 1

Свойства пластовой жидкости и газа

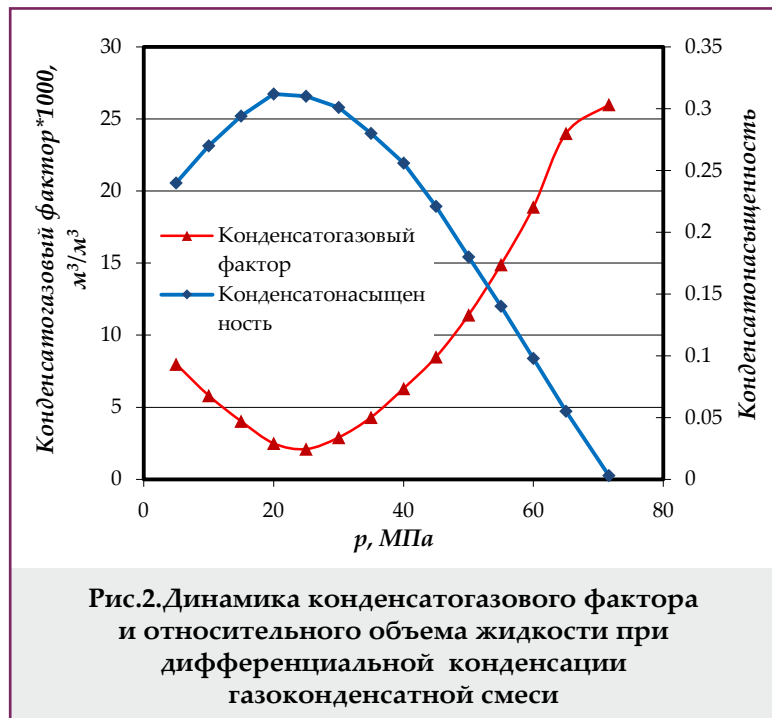
p , МПа	Плотность газа, г/см ³	Плотность конденсата, г/см ³	Вязкость газа, мПа·с	Вязкость конденсата, мПа·с	Конденсатонасыщенность
71.6	0.465	0.465	0.062	0.121	0
65.0	0.411	0.485	0.056	0.133	0.129
60.0	0.383	0.511	0.051	0.144	0.192
55.0	0.341	0.535	0.046	0.154	0.25
50.0	0.304	0.553	0.04	0.173	0.29
45.0	0.262	0.591	0.035	0.201	0.33
40.0	0.221	0.618	0.029	0.233	0.36
35.0	0.183	0.644	0.024	0.271	0.387
30.0	0.144	0.682	0.021	0.31	0.4
25.0	0.114	0.707	0.018	0.35	0.395
20.0	0.079	0.734	0.015	0.4	0.37
15.0	0.044	0.758	0.012	0.47	0.34
10.0	0.031	0.773	0.01	0.55	0.29
5.0	0.0025	0.781	0.008	0.63	0.25

истощения [9]:

$$f_g(s_g) = 0.9 \cdot s_g^{2.89}, \quad f_l(s_l) = 0.78 \cdot s_l^2$$

С целью идентификации фазового состояния пластовой смеси VII горизонта были проведены расчеты на основе дифференциальной конденсации и получены зависимости конденсатной характеристики природных углеводородных систем от давления (рис.2). Видно, что понижение пластового давления от 71.6 до 25.0 МПа

сопровождается выделением преимущественно количества углеводородов из газа в жидкость. Это проявляется в увеличении значения конденсатонасыщенности и уменьшении конденсатого фактора (область давления от начала конденсации до максимальной конденсации). При понижении давления от 25.0 до 5.0 МПа преобладают процессы испарения углеводородов из жидкости в газ, что находит отражение в уменьшении значения конденсатонасыщенности и увеличении



конденсатоголовых факторов (область давления ниже максимальной конденсации).

Начиная с 1975 года до конца 2000 года из скважин VII горизонта было добыто: $14.7 \cdot 10^9$ м³ газа и $3.5082 \cdot 10^6$ т конденсата. К рассматриваемой дате остаточные запасы в залежах составляют для газа $18.5 \cdot 10^9$ м³ (в процентах более 56%) и $7.2 \cdot 10^6$ т - для конденсата (более 68.5%), т.е. огромные ресурсы жидких углеводородов почти потеряны в пласте. В этот период разработки значение конденсатонасыщенности изменяется по залежи в большом интервале от 0.17 до 0.76. При этом значение пластового давления по залежи изменялось в интервале 14.4-12.1 МПа и соответствовало области да-

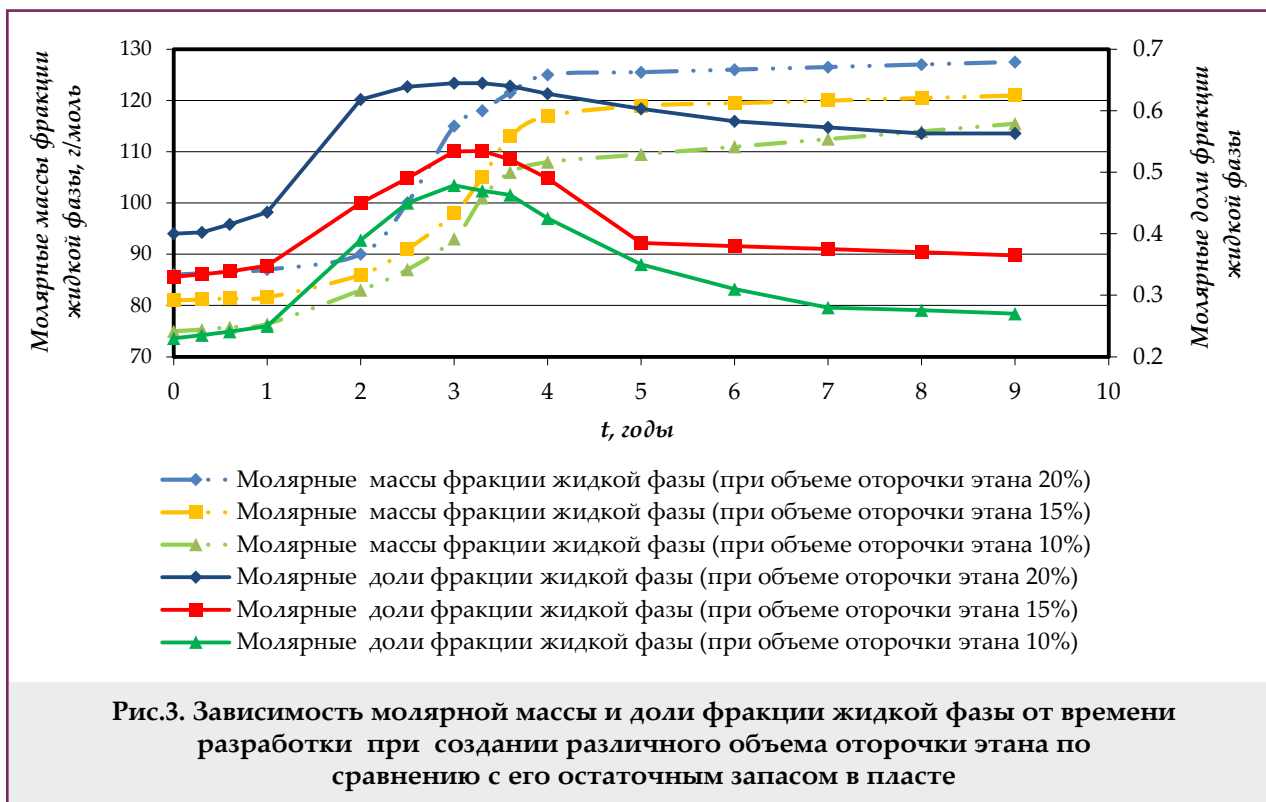
вления ниже максимальной конденсации.

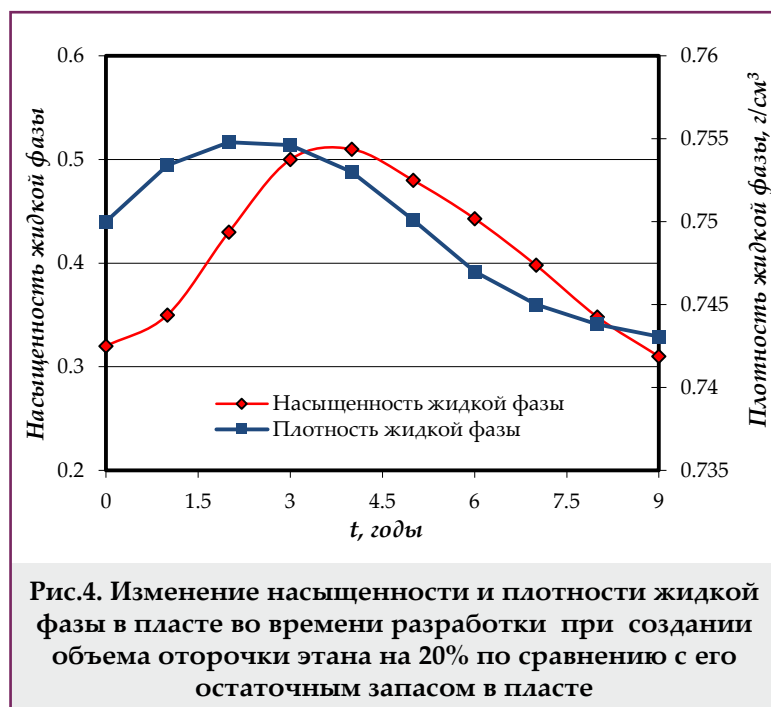
Для интенсификации показателей жидких углеводородов проводится газовое воздействие (последовательное нагнетание этана и сепарированного газа) на пласт. С этой целью переводим не работающие скважины 20, 44, 74 в нагнетательные, работающие скважины 39, 46, 73 почти находятся в сфере их влияния.

Предусматривается повышение среднего пластового давления от 12 до 16 МПа, путем закачки в залежь в виде оторочки этана с последующим нагнетанием сепарированного газа, для которого выдерживается превышение объема закачки над объемом отбора флюидов из пласта в соотношении 2:1. Затем процесс вытеснения конденсата и газа продолжается при постоянном пластовом давлении, т. е. при равных объемах отбора флюидов и закачки.

При создании оторочки использовались разные объемы 10; 15; 20% закачки этана по сравнению с его остаточным запасом в пласте. Объем закачиваемого сепарированного газа в пласт изменяется примерно в пределах от $22.63 \cdot 10^8$ м³ и до $23.4 \cdot 10^8$ м³. Процесс разработки продолжается около 8 лет. За этот период разработки все эксплуатационные скважины, работающие в пласте, доходят своих первоначальных дебитов в режиме истощения.

Результаты расчетов представлены на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 представлены изменения молярной массы и доли фракции жидкой фазы C₅₊ от времени разработки при создании различного объема оторочки этана с последующим нагнетанием сепарированного газа. Увеличение пластового давления от 12 до 16 МПа произойдет





к 4 году разработки (рис.3 и 4). В этот период разработки уже выпавший в пласте ретроградный конденсат интенсивно вытесняется газами, обогащенными этаном и одновременно этан растворяется в нем. Исходя из этого, в пласте значение молярной массы и доли фракции жидкой фазы в среднем увеличивается, примерно, от 1.3 до 1.5 раза. В период разработки воздействия при постоянном пластовом давлении, вытеснение ретроградного конденсата и растворения этана в конденсате ослабляется, и значение молярной массы и доли фракции жидкой фазы в пласте постепенно уменьшается.

Видно, что этан растворяясь в ретроградном конденсате при непрерывном массообмене между фазами системы, создает на фронте вытеснения вал жидких углеводородов насыщенности выше критической, при которой начинается

двухфазная фильтрация. Эффективность процесса вытеснения выпавшего конденсата повышается с увеличением объема оторочки этана (рис.3).

На рисунке 4 показаны изменение насыщенности и плотности жидкой фазы в пласте в зависимости от времени разработки при создании объема оторочки этана на 20% по сравнению с его остаточным запасом в пласте с последующим нагнетанием сепарированного газа. Видно, что насыщенность и плотность конденсата возрастает по мере закачки сепарированного газа. При поступлении в пласт сепарированный газ обогащается этаном, и приводит пополнению пластовой жидкой фазы - ретроградного конденсата. Хотя часть этана остается в газовой фазе, его основная масса обеспечивает разбухание жидкой фазы, в результате насыщенность порового пространства жидкой фазой возрастает до порога гидродинамической подвижности в пласте. Вследствие этого содержание высокомолекулярных компонентов в продукции добывающих скважин увеличивается. В итоге повышается конденсатоотдача пласта (табл.2).

В случаях закачки сепарированного газа после создания 10%, 15% и 20%-ной оторочки этана прирост конденсатоотдачи пласта по сравнению с режимом истощения составляет примерно 7.7%, 9.3% и 10.8% соответственно и это означает соответственно примерно 0.8239, 0.9951, 1.1556 млн.т дополнительной добычи ретроградного конденсата.

Таким образом, исследования показывают, что при разработке газоконденсатных месторождений на завершающей стадии истощения с созданием объема оторочки этана в пласте с последующим нагнетанием сепарированного газа представляется возможным интенсификация извлечения ретроградного конденсата.

Таблица 2

Изменение прироста коэффициента извлечения конденсата в пласте при создании различного объема оторочки этана по сравнению с режимом истощения

Режимы разработки залежи	Объем закачки, млн.м³	Предполагаемая добыча без закачки		Дополнительная суммарная добыча после закачки по конденсату, млн. т	Конденсатоотдача, %
		по конденсату, т	по газу, тыс.м³		
Истощение	-	4680	82056	-	31.5
Закачка сепарированного газа после создания 10% оторочки этана	2340, в том числе этан - 76.035	-	-	0.8239	39.2
Закачка сепарированного газа после создания 15% оторочки этана	2301.985, в том числе этан - 114.05	-	-	0.9951	40.8
Закачка сепарированного газа после создания 20% оторочки этана	2263.9, в том числе этан - 152.07	-	-	1.1556	42.3

Выводы

На основании математического моделирования исследованы процессы последовательного нагнетания этана и сепарированного газа в газоконденсатную залежь на завершающей стадии разработки. Установлено:

- представляется возможным интенсификация извлечения ретроградного конденсата на завершающей стадии разработки газоконденсатной залежи с созданием объема оторочки этана в пласте с последующим нагнетанием сепарированного газа. Физическая сущность предлагаемого воздействия заключается в значительном смещении фазового равновесия в пластовой двухфазной системе в сторону жидкой фазы, что позволяет вовлечь в разработку запасы ретроградного углеводородного конденсата;

- этан растворяясь в ретроградном конденсате при непрерывном массообмене между фазами системы, создает на фронте вытеснения вал жидких углеводородов насыщенности выше критической;

- увеличение коэффициента конденсатоизвлечения возможно более на 10% по сравнению с режимом разработки на истощение.

Литература

1. Жузе, Т.П. (1974). Сжатые газы как растворители. *Москва: Наука.*
2. Степанова, Г.С. (1974). Фазовые превращения углеводородных смесей газоконденсатных месторождений. *Москва: Недра.*
3. Намиот, А.Ю. (1976). Фазовые равновесия в добыче нефти. *Москва: Недра.*
4. Фейзуллаев, Х.А., Алиев, И.Н. (2014). Влияния состава углеводородной смеси на конденсатоотдачу при разработке пласта в режиме истощения. *SOCAR Proceedings, 3, 71-76.*
5. Jalalov, G.I., Feyzullayev, Kh.A., Khalilov, M.S. (2018). Sumulation of gas-condensate deposits development. *Transactions of ANAS. Issue Mechanics, 38(7), 23-32.*
6. Брусиловский, А.И. (2002). Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. *Москва: Грааль.*
7. Азиз, Х., Сеттари, Э. (1982). Математическое моделирование пластовых систем. *Москва: Недра.*
8. Абасов, М.Т., Джеваншир, Р.Д., Кондурушин, Ю.М. и др. (1994). Оценка подтвержденности промышленных запасов газа и конденсата, анализ текущего состояния и рекомендации по повышению надежности подсчета запасов на морских месторождениях Каспийского моря Азербайджана. *Баку: Фонд Института Геологии НАН Азербайджана.*
9. Абасов, М.Т., Джалалов, Г.И., Кулиев, Г.Ф., Фейзуллаев, Х.А. (2004). Идентификация функций относительных фазовых проницаемостей при фильтрации газоконденсатной смеси. *Известия НАН Азербайджана. Серия наук о Земле, 2, 8-81.*

References

1. Zhuze, T.P. (1974). Szhatye gazy kak rastvoriteli. *Moskva: Nauka.*
2. Stepanova, G.S. (1974). Fazovye prevrashcheniya uglevodorodnyh smesey gazokondensatnyh mestorozhdenij. *Moskva: Nedra.*
3. Namiot, A.Yu. (1976). Phase equilibria in oil production. *Moscow: Nedra.*
4. Feyzullayev, Kh.A., Aliyev, I.M. (2014). The influence of composition of hydrocarbon mixture on condensate recovery in the development of depletion method. *SOCAR Proceedings, 3, 71-76.*
5. Jalalov, G.I., Feyzullayev, Kh.A., Khalilov, M.S. (2018). Sumulation of gas-condensate deposits development. *Transactions of ANAS. Issue Mechanics, 38(7), 23-32.*
6. Brusilovsky, A.I. (2002). Phase transformations in the development of oil and gas fields. *Moscow: Grail.*
7. Aziz, Kh., Settari, A. (1979). Petroleum reservoir simulation. *London: Applied Science Publishers LTD.*
8. Abasov, M.T., Dzhevanshir, R.D., Kondurushin, YU.M. i dr. (1994). Ocenka podtverzhdaemosti promyshlennyh zapasov gaza i kondensata, analiz tekushchego sostoyaniya i rekomendacii po povysheniyu nadezhnosti podscheta zapasov na morskikh mestorozhdeniyah Kaspijskogo morya Azerbajdzhana. *Baku: Fond Instituta Geologii NAN Azerbajdzhana.*
9. Abasov, M.T., Dzhahalov, G.I., Kuliev, G.F., Feyzullayev, H.A. (2004). Identifikaciya funkciy odnositel'nyh fazovyh pronicaemostej pri fil'tracii gazokondensatnoj smesi. *Izvestiya NAN Azerbajdzhana. Seriya nauk o Zemle, 2, 8-81.*

Повышение конденсатоотдачи газоконденсатных залежей на завершающей стадии разработки

М.С.Халилов

Бакинский Государственный Университет, Баку, Азербайджан

Реферат

На основе двухфазной многокомпонентной модели фильтрации исследован процесс извлечения ретроградного конденсата на завершающей стадии разработки газоконденсатной залежи, с созданием объема оторочки этана в пласте с последующим нагнетанием сепарированного газа. Установлено, что этан растворяясь в ретроградном конденсате при непрерывном массообмене между фазами системы, создает на фронте вытеснения вал жидких углеводородов насыщенности выше критической, при которой начинается двухфазная фильтрация, что позволяет вовлечь в разработку запасы ретроградного углеводородного конденсата и, в конечном счете, обеспечивает эффективность разработки залежи.

Ключевые слова: режим истощения; нагнетание этана и сепарированного газа; ретроградный конденсат; объем оторочки этана; давление ниже максимальной конденсации.

Tükənmə rejimində olan qazkondensat laylarında kondensat veriminin artırılması

M.S.Xəlilov

Bakı Dövlət Universiteti, Bakı, Azərbaycan

Xülasə

Etan və separasiya olunmuş qazın ardıcıl vurulması ilə ikifazlı çoxkomponentli süzülmə modeli əsasında tükənmə rejimində olan qazkondensat laylarından retroqrad kondensatın çıxarılması imkanları tədqiq edilmişdir. Separasiya olunan qaz laya daxil olduqca etan qazı ilə zənginləşir. Etanın bir hissəsi qaz fazasında qalsa da, onun əsas kütləsi maye fazanın həcmnin artmasını təmin edir və məsamələr fəzasının kifayət qədər maye faza ilə doyması nəticəsində onun layda hidrodinamik hərəkətliliyi baş verir. Nəticədə hasilat quyularında istehsalda yüksək molekulyar komponentlərinin miqdarı artır və layın kondensata görə məhsuldarlığı yüksəlir.

Açar sözlər: tükənmə rejimi; etan və separasiya olunmuş qazın vurulması; retroqrad kondensat; qalıq etanın həcmi; maksimal kondensasiya təzyiqindən aşağı təzyiq.