

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА НА ЕГО УПРУГУЮ ЭНЕРГИЮ

УДК 622.324

О.В. Николаев, к. т. н., ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Москва, РФ), O_Nikolaev@vniigaz.gazprom.ru

В.В. Медко, к. т. н., ООО «Газпром ВНИИГАЗ», V_Medko@vniigaz.gazprom.ru

Статья посвящена анализу влияния энергообмена между элементами пластовой системы на энергетический потенциал пластового газа в процессе разработки газовой залежи. Поскольку во многих случаях целевые величины конечной газоотдачи задаются на достаточно высоких уровнях (вплоть до 0,95–0,98), на поздней стадии разработки важнейшей задачей является обеспечение благоприятных условий для наиболее полного извлечения газа и его движения под действием собственной упругой энергии от контура питания к забою, по стволу скважины и в наземных коммуникациях до компрессорной станции, которая сообщает газу дополнительную энергию, в первую очередь для дальнейшей его поставки в магистральный газопровод.

По мере истощения залежи в процессе разработки имеют место по крайней мере два термодинамических процесса, направленных на снижение температуры газа, поступающего к забою скважины: совершение пластовым газом работы расширения и дросселирование газа. В то же время значительная теплоемкость вмещающих пород приводит к передаче газу дополнительной энергии в виде тепла, способствуя его термостатированию и повышению упругой энергии, что улучшает условия его транспортировки из пласта к дожимной компрессорной станции (ДКС).

Выполнение «энергетических» исследований фильтрации газа в продуктивном пласте представляется полезным, особенно применительно к поздней стадии разработки месторождений, когда возникают дополнительные сопротивления по ходу движения газа во всех участках тракта от пласта до установки комплексной подготовки газа (УКПГ), связанные с увеличением содержания жидкой фазы. Результаты соответствующих расчетов позволят проектировать мероприятия по доразработке газовой залежи на основе более полного объема газопромысловой информации, что будет способствовать повышению научной обоснованности принимаемых научно-технических решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ДОБЫЧА ПРИРОДНОГО ГАЗА, РАЗРАБОТКА ИСТОЩЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, УПРУГИЙ ПОТЕНЦИАЛ ПЛАСТОВОЙ СИСТЕМЫ, КОЭФФИЦИЕНТ СЖИМАЕМОСТИ, АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС.

Наличие у пластовой системы значительного упругого потенциала и относительно низкая вязкость углеводородного газа в условиях залежей позволяют добывать этот флюид за счет использования природной упругой энергии системы, обеспечивая коэффициенты извлечения газа (КИГ) до 0,80–0,90 от начальных запасов.

В силу исключительной ценности природных углеводородных газов как газохимического сырья и высококалорийного топлива во многих случаях при проектировании доразработки залежей задаются целевые величины

КИГ до 0,95–0,98. Поскольку по мере отбора газа соответственно уменьшается упругий потенциал пластовой системы, а чаще всего одновременно прогрессирует обводнение добывающих скважин, для достижения указанных величин КИГ, как правило, требуется решать достаточно сложные газопромысловые задачи. Исследования свидетельствуют о том, что при этом целесообразно проводить оценку, в том числе, влияния на отбор газа динамики упругой энергии пластовой системы.

В связи с этим следует отметить особую значимость уравнения Менделеева – Клапейрона:

$$pV = znRT, \quad (1)$$

которое традиционно используется в качестве уравнения состояния, однако из анализа размерностей можно видеть, что оно позволяет также рассчитывать упругую энергию n молей газа, занимающих объем V при давлении p и температуре T (z – коэффициент сжимаемости газа, R – универсальная газовая постоянная):

$$[pV] = [znRT] = \text{Па} \cdot \text{м}^3 = \text{моль} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К} / (\text{К} \cdot \text{моль}) = \text{Дж}. \quad (2)$$

При этом, поскольку известно, что в содержащем любые флюиды

Nikolaev O.V., Ph.D. in Engineering Science, Gazprom VNIIGAZ (Moscow, RF), o_nikolaev@vniigaz.gazprom.ru

Medko V.V., Ph.D. in Engineering Science, Gazprom VNIIGAZ, v_medko@vniigaz.gazprom.ru

Impact of gas filtration conditions upon its elastic energy

The article is dedicated to the analysis of an impact of energy exchange between the elements of the formation system upon the energy potential of formation gas during the development of a gas deposit. As in many cases, the target values of ultimate gas recovery are set at rather high levels (up to 0.95–0.98) at a later stage of development, the most important task is to ensure favorable conditions for the most complete recovery of gas and its movement under the influence of its own elastic energy from the feed circuit to the bottom hole, along the well shaft and in underground communications up to the compressor plant which gives gas additional energy, first of all, for its subsequent delivery to the main gas pipeline.

As the deposit is being depleted in the process of development, there are at least two thermodynamic processes aimed at decreasing the temperature of gas which is delivered to the well's bottom hole: formation gas expansion and gas throttling. At the same time, significant heat-absorbing capacity of the bearing strata leads to gas receiving additional energy in the form of heat, which contributes to its thermostatic control and elastic energy increase which improves the conditions of its transportation from the bed to the booster compressor station (BCS).

Energy-related research of gas filtration in the pay bed is deemed to be useful, especially at a later stage of field development when there occur additional resistances in the director of gas travel at all stages of the path from the bed to the complex gas treatment plant (CGTP), which are related to an increase in liquid phase content. The results of relevant calculations will allow designing events aimed at further developing a gas deposit based upon more comprehensive gas field information which will contribute to the improvement of scientific validation of research and engineering solutions which are adopted.

KEY WORDS: NATURAL GAS RECOVERY, DEPLETED FIELD DEVELOPMENT, ELASTIC POTENTIAL OF THE BED SYSTEM, COMPRESSIBILITY COEFFICIENT, ADIABATIC PROCESS.

пласте горных пород доля теплоемкости последних составляет не менее 90–95 %, следует говорить об эффективности использования упругой энергии не просто пластового газа, а пластовой системы в целом.

Сказанное побудило авторов провести исследования аналитического типа для выявления, в том числе, роли каждой из величин, входящих в уравнение Менделеева – Клапейрона, при формировании упругой энергии пластовой системы [1], особенно температуры. Конечной целью исследований являлась оценка возможностей наиболее эффективного использования указанной природной энергии для обеспечения максимально достижимых КИГ при разработке газовых залежей.

Была рассмотрена энергетика разработки модели сеноманской залежи месторождения Медвежье, а также почти двух десятков модельных пластовых систем, отличающихся друг от друга сжимаемостью газа, температурным режимом пласта и скважины, наличием или отсутствием обводнения залежи.

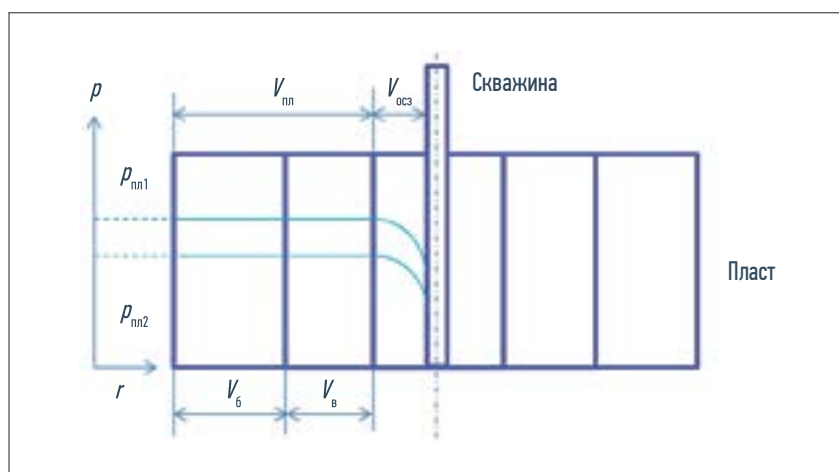


Рис. 1. Схематический разрез пласта со скважиной и околоскважинной зоной: r – радиальная координата

Поскольку физической основой разработки залежи является техногенная реализация массопереноса флюида по продуктивному пласту, представляет интерес исследование энергетики, в том числе процесса фильтрации газа, с учетом влияния теплоемкости вмещающих горных пород [2].

В статье рассмотрены изотермическая (ИТФ) и адиабатическая (АФ) фильтрации газа в пласте, а также влияние эффекта Джоуля – Томсона на температуру газа,

поступающего к забою скважины. Расчеты осуществлялись для условий радиальной фильтрации метана в качестве модели пластового газа в пласте с коллекторскими свойствами, соответствующими свойствам сеноманских отложений месторождения Медвежье.

На рис. 1 представлен схематический разрез пласта цилиндрической формы, иллюстрирующий алгоритм расчетов. Выделена примыкающая к забою около-

скважинная зона, где при отборе газа часть депрессионной воронки характеризуется наибольшей крутизной. Несомненно, объем газа в околоскважинной зоне $V_{осз}$ мал по сравнению с объемом всего пласта $V_{пл}$. Для расчетов принято, что за пределами околоскважинной зоны в объеме пласта имеет место термодинамическое равновесие. В реальном пласте это не всегда так, однако в первом приближении для оценочных расчетов допустимо предположить, что в каждый момент времени давление и температура одинаковы во всех точках пласта, т. е. процесс извлечения газа носит квазистатический характер. В случае АФ допустимо считать, что температура газа в пласте снижается по мере уменьшения пластового давления, поскольку газ совершает работу расширения, при этом в околоскважинной зоне температура газа дополнительно снижается за счет эффекта Джоуля – Томсона. В случае ИТФ допустимо считать, что приток тепла от скелета пористой среды коллектора полностью компенсирует возможное охлаждение газа как в пласте, так и в околоскважинной зоне.

В момент времени t_1 пластовое давление и температура равны $p_1 = p_{пл}(t_1)$ и $T_1 = T_{пл}(t_1)$. К моменту времени $t_2 > t_1$ пластовое давление и температура равны $p_2 = p_{пл}(t_2)$ и $T_2 = T_{пл}(t_2)$, причем газ, занимающий в момент времени t_2 весь объем пласта $V_{пл}$, в момент времени t_1 имел объем V_6 («базовый объем», рис. 1). Вытесненный объем газа за период времени $\Delta t = t_2 - t_1$ на этом рисунке обозначен V_6 . Очевидно, имеет место геометрическое соотношение:

$$V_{пл} = V_6 + V_6. \quad (3)$$

Для количества газа, занимающего в момент t_1 базовый объем V_6 , можно записать:

$$\frac{V_6 p_1}{z_1 T_1} = \frac{V_{пл} p_2}{z_2 T_2}. \quad (4)$$

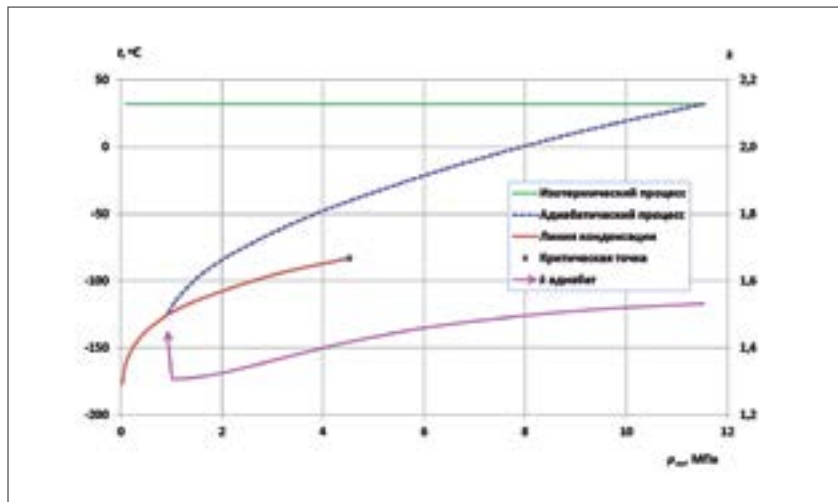


Рис. 2. Динамика температуры пластового газа как функция пластового давления при ИТФ и АФ

При этом базовый объем газа по мере расширения до объема $V_{пл}$ совершает работу.

В случае адиабатического расширения конечная температура газа связана с начальной соотношением Цейнера [3]:

$$z_1 T_1 V_6^{k-1} = z_2 T_2 V_{пл}^{k-1}, \quad (5)$$

где k – показатель адиабаты, зависящий от текущих пластовых термобарических условий. Для случая изотермического расширения справедливо выражение (3) при очевидном ограничении $T_1 = T_2 = \text{const}$.

Коэффициент сжимаемости газа $z(p, T)$ рассчитывали по корреляции Д.Х. Беггса и Дж.П. Брилла [4]. Показатель адиабаты и коэффициент Джоуля – Томсона определяли по справочным данным для метана [5, 6].

Основные результаты приведены на рис. 2–5 в форме зависимостей ряда параметров пластовой системы от текущего давления в продуктивном пласте. На рисунках использованы сокращения: ИТФ – условный вариант полного термостатирования потока метана породами (изотермическая фильтрация); АФ – также условный вариант полной теплоизоляции потока метана (адиабатическая фильтрация); E – удельная (в рас-

чете на 1 ст. м³) упругая энергия фильтрующегося метана в пласте и на забое скважины.

Из рис. 2 следует, что в адиабатическом режиме температура газа снижалась бы значительно (даже ниже критической), достигая условий конденсации метана при предельном пластовом давлении 0,925 МПа. Для этого же случая на рис. 2 изображена зависимость от пластового давления показателя адиабаты, который является параметром процесса и по достижении пластовым давлением предельной величины возрастает скачком многократно, делая дальнейшее извлечение газа невозможным.

На рис. 3 для двух рассматриваемых случаев изображены зависимости коэффициента извлечения газа от пластового давления. Из рисунка видно, что для случая адиабатической фильтрации коэффициент извлечения газа не может превышать величину КИГ = 0,87. Также следует, что для любого пластового давления при ИТФ коэффициент извлечения всегда существенно выше, чем при АФ.

Переходя к анализу энергетической характеристики пластового газа в процессе разработки залежи, необходимо отметить, что на поведение пластового

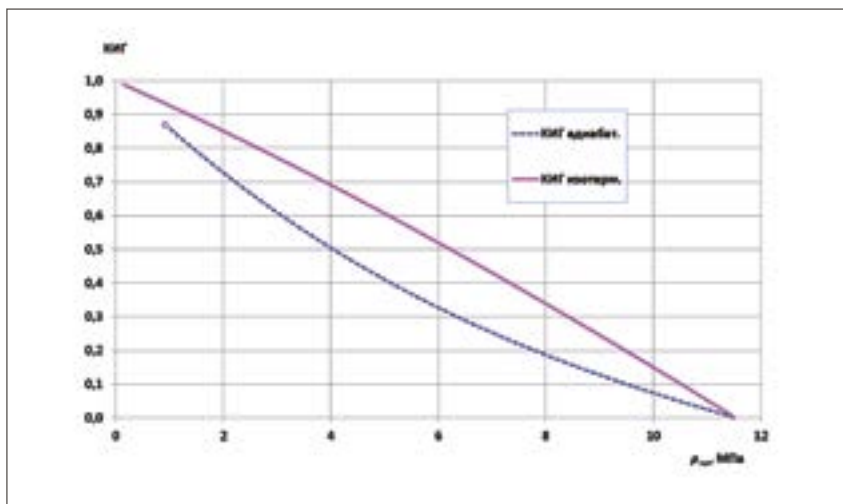


Рис. 3. Зависимость коэффициента извлечения газа от пластового давления

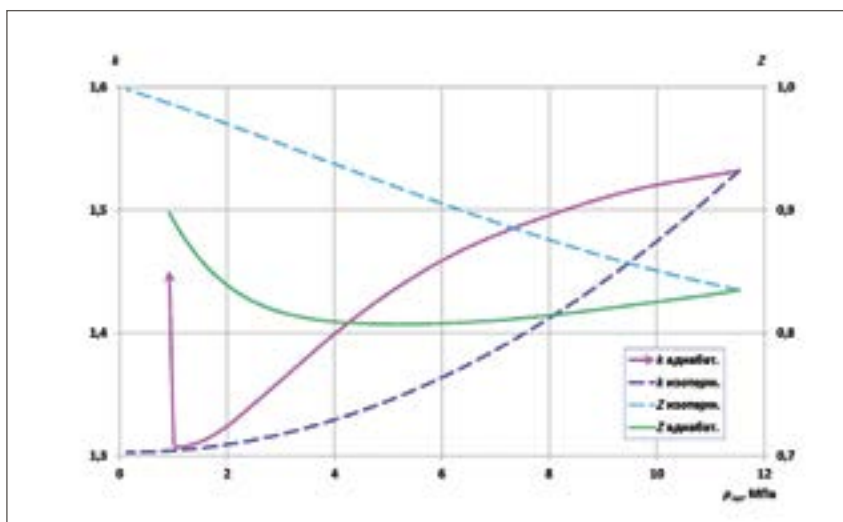


Рис. 4. Зависимости показателя адиабаты k и коэффициента сжимаемости z газа от пластового давления для изотермического и адиабатического процессов

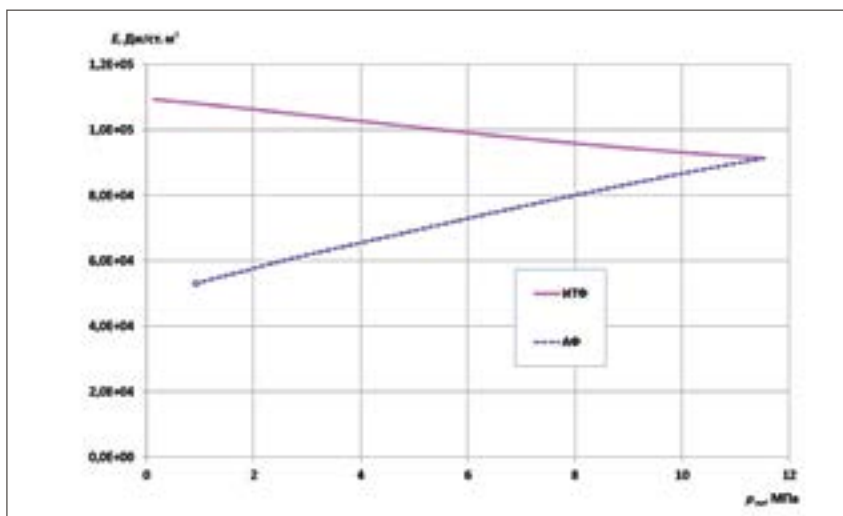


Рис. 5. Динамика удельной упругой энергии метана при изотермической и адиабатической фильтрации

газа существенно влияет, помимо показателя адиабаты k , также и коэффициент сжимаемости газа z .

На рис. 4 представлены зависимости $k = k(p)$ и $z = z(p)$ для пластового газа при изотермическом и адиабатическом процессах. Из рисунка видно, что коэффициент z , как и показатель адиабаты k , зависит от характера теплового взаимодействия пластового газа со скелетом пористой среды, в частности, в изотермическом случае коэффициент z существенно выше.

Оценка влияния эффекта Джоуля – Томсона дает величину возможного снижения температуры на забое в пределах менее полуградуса, что позволяет пренебречь этим эффектом, по крайней мере применительно к условиям месторождения Медвежье [2].

Расчеты показывают, что упругая энергия E поступающего на забой газа увеличивается значительно за счет притока тепла от скелета пористой среды коллектора, что проявляется уже на первых этапах разработки. К концу разработки дополнительный прирост энергии составляет почти 100 %, что отражено на рис. 5, на котором представлены зависимости $E = E(p)$ для изотермической и адиабатической фильтрации.

Для условий фильтрации газа в типичном реальном пласте характерна верхняя зависимость рис. 5, которая отражает рост удельной упругой энергии газа по мере снижения давления при ИТФ за счет влияния увеличения величины z как в пласте, так и в околоскважинной зоне.

В альтернативном гипотетическом случае реализации варианта АФ, когда условно полностью отсутствует теплопередача со стороны горных пород, удельная упругая энергия газа в пласте и в околоскважинной зоне оказывается намного меньше, чем в варианте ИТФ (нижняя и верхняя кривые на рис. 5).



Очевидно, что с учетом данных рис. 2 можно обоснованно предполагать, что при фильтрации газа в условиях натурального пласта зависимости удельной упругой энергии пластовой системы во всех реальных случаях будут близки к верхней кривой рис. 5.

Таким образом, вследствие естественных особенностей пластовой системы в ходе разработки залежи удельная упругая энергия флюида увеличивается. Это отчасти компенсирует падение пластового и забойного давлений. В условиях однофазного притока пластового флюида к забоям добывающих скважин данное обстоятельство явилось бы предпосылкой к длительной устойчивой работе эксплуатационного фонда скважин в период доработки залежей и могло бы обеспечить высокие конечные КИГ.

К сожалению, на практике при эксплуатации газовых залежей приходится иметь дело с наличием как в пласте, так и в стволах скважин двухфазной, например водогазовой, смеси. Поэтому в условиях еще достаточной «энергетической» обеспеченности газовой залежи в период доработки проблемы отбора остаточных запасов углеводородов оказываются обусловленными достаточно серьезным негативным влиянием обычно все более осложняющейся структуры потока пластовой смеси на массоперенос газа по пласту, а также по стволам и шлейфам скважин.

Несмотря на данное замечание, выполнение «энергетических» исследований даже однофазной фильтрации газа в продуктивном пласте представляется полезным.

Результаты соответствующих расчетов позволяют проектировать мероприятия по разработке и доработке газовой залежи на основе более полного объема информации.

Например, принимая во внимание значительную роль теплопередачи пластовым флюидам со стороны вмещающих горных пород, можно обеспечить «энергообогащение» притока пластовой смеси к добывающим скважинам путем размещения части дренирующих стволов в зоне пласта с наиболее высокой температурой. Возможны, естественно, и другие научно-технические решения, позволяющие повысить эффективность разработки залежей за счет технологически активного использования упругой энергии пластовой системы. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев В.А., Николаев О.В. Энергетика пласта в технологических процессах разработки месторождений нефти и газа. М.–Ижевск: Ин-т комп. иссл., 2014. 216 с.
2. Истомин В.А. Неизотермическая фильтрация газа в призабойной зоне пласта // Вести газовой науки: Проблемы эксплуатации газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений. 2013. № 4 (15). С. 132–141.
3. Бурдаков В.П., Дзюбенко Б.В., Меснянкин С.Ю., Михайлова Т.В. Термодинамика. Ч. 1. М.: Дрофа, 2009. 479 с.
4. Brill J.P., Beggs H.D. Two-Phase Flow in Pipes. Tulsa, Tulsa University, 1991. 640 pp.
5. Термодинамические свойства метана: ГСССД. М.: Изд-во стандартов, 1979. 348 с.
6. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.

REFERENCES

1. Nikolaev V.A., Nikolaev O.V. Bed's Energy in Technological Processes of the Development of Oil and Gas Deposits. Moscow, Izhevsk, Institute of Computer Research, 2014, 216 pp. (In Russian)
2. Istomin V.A. Non-Isothermal Gas Filtration in the Bed's Bottom-Hole Area. Vesti gazovoi nauki: Problemy ekspluatatsii gazovykh, gazokondensatnykh i neftegazokondensatnykh mestorozhdeniy = Bulletin of Gas Science: Operating Problems of Gas, Gas Condensate and Oil and Gas Condensate Fields, 2013, No. 4 (15), P. 132–141. (In Russian)
3. Burdakov V.P., Dzyubenko B.V., Mesnyankin S.Yu., Mikhaylova T.V. Thermodynamics. P. 1, Moscow, Drofa, 2009, 479 pp. (In Russian)
4. Brill J.P., Beggs H.D. Two-Phase Flow in Pipes. Tulsa, Tulsa University, 1991. 640 pp.
5. Thermodynamic Properties of Methane: State Standard Reference Data Service. Moscow, Publishing House of Standards, 1979, 348 pp. (In Russian)
6. Vargaftik N.B. Reference Book on Thermal and Physical Properties of Gases and Liquids. Moscow, Science, 1972, 721 pp. (In Russian)