

УДК 552.578.1: 608:622.23 + 622.276.438:628.543

В.А. Истомина, Д.М. Федулов, И.И. Минаков, В.Г. Квон, С.В. Буракова

Предупреждение гидратообразования в призабойной зоне пласта при высокой минерализации остаточной воды в коллекторе

Призабойная зона пласта (ПЗП) в условиях низких пластовых температур может оказаться в режиме гидратообразования как при технологических режимах работы скважин, так и при проведении газодинамических исследований. При этом скважины могут достаточно длительное время работать в режиме накопления гидратов в поровом пространстве коллектора призабойной зоны. Такая ситуация будет характерна при освоении в ближайшие годы надсеноманских (сенон-туронских) залежей месторождений Западной Сибири, месторождений п-ова Ямал (апт-альбские отложения), а также для месторождений Восточной Сибири с аномальными термобарическими пластовыми условиями.

В связи с этим представляется актуальным определение безгидратных режимов работы ПЗП, а также разработка технологических способов и приемов по управлению динамикой гидратоотложения. При эксплуатации таких объектов также могут быть актуальными мероприятия по очистке призабойной зоны от водной фазы для снижения рисков гидратоотложения и увеличения длительности работы скважин с приемлемыми дебитами.

Для расчетов безгидратных дебитов скважин помимо фильтрационных характеристик (коэффициентов фильтрационных сопротивлений A и B) необходимо знать условия гидратообразования пластового газа с учетом минерализации остаточной воды в коллекторе. На ряде месторождений Восточной Сибири имеет место высокая минерализация остаточных (внутриконтурных) вод в коллекторе [1].

Для расчета условий гидратообразования при условии контакта пластового газа с высокоминерализованной водой, строго говоря, требуется привлечение теории сильных электролитов. Авторами проведен детальный анализ литературных данных по условиям гидратообразования различных газов в растворах индивидуальных и смешанных электролитов, показывающий, что вне зависимости от типа рассматриваемых солей изменение условий гидратообразования в минерализованном растворе по отношению к гидратообразованию в пресной воде (величина температурной сдвигки ΔT) в основном определяется только активностью воды в растворах электролитов (рассчитанной при атмосферном давлении). При этом роль других факторов (варьирование состава гидратной фазы, растворимость газов в водно-солевых растворах, а также влияние внешнего давления на химический потенциал воды в растворе) оказывается незначительной – они неявно учитываются при построении корреляций ΔT только от активности воды в водно-солевых растворах.

Сравнение различных методов расчета активности воды в концентрированных растворах электролитов показывает, что для типичных составов пластовых вод расчет активности допустимо проводить по классическому правилу А.Б. Здановского [2]. При этом погрешность расчета для хлоридно-сульфидно-карбонатных солей щелочных и щелочноземельных элементов практически такая же, как и при использовании современных расчетных схем по методике К. Питцера и ее обобщениям, и не превышает 1–2 %.

Для проверки допущения относительно активности воды в растворе как определяющего фактора для изменения условий гидратообразования (вне зависимости от типа электролита) были сопоставлены расчетные и экспериментальные данные

Ключевые слова: призабойная зона пласта, гидратообразование, минерализация пластовой воды, безгидратная депрессия, смачиваемость коллектора.

Keywords: bottom hole formation zone, hydrate formation, formation water salinity, non-hydrate pressure drop, reservoir wettability.

по условиям гидратообразования в системах «электролит (смесь электролитов) – вода – метан».

Зависимость условий гидратообразования от минерализации воды для системы «метан – вода – хлорид натрия» описывается, в частности, формулой [3]

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = \frac{8160,43}{T} + 33,1103 - 128,65x + 40,28x^2 - 138,49\ln(1-x), \quad (1)$$

где x – молярная доля NaCl в растворе; P – давление, МПа ($P_0 = 0,101325$ МПа); T – температура, К.

По уравнению (1) были рассчитаны условия гидратообразования для различных концентраций NaCl (от 0 до 311 г/л), затем молярные концентрации были пересчитаны на активность воды в соответствующих растворах. Полученные зависимости представлены в графическом виде (рис. 1). Линия, соответствующая чистой воде, характеризуется активностью воды, равной 1,0, линия, соответствующая

сытому раствору NaCl (26 % мас., или 311 г/л), – активностью воды, равной 0,76. Также на рис. 1 приведены экспериментальные данные по условиям гидратообразования в растворах различных солей и их смесей [4–6].

Согласно рис. 1, при одинаковой активности воды в растворе наблюдается хорошая согласованность экспериментальных и расчетных условий гидратообразования метана в растворах электролитов и их смесей различной концентрации, включая область рассолов. Это подтверждает предположение о возможности использования активности воды в растворе электролита при расчетах условий гидратообразования.

При давлении 9 МПа смещение температуры гидратообразования при переходе от чистой воды к насыщенному раствору хлорида натрия составляет 19 °С (с 12 до –7 °С). Такое смещение может объяснять отсутствие гидратов в залежах с высокой минерализацией и подходящими термобарическими условиями.

Это дало возможность распространить методику расчета условий гидратообразования [7]

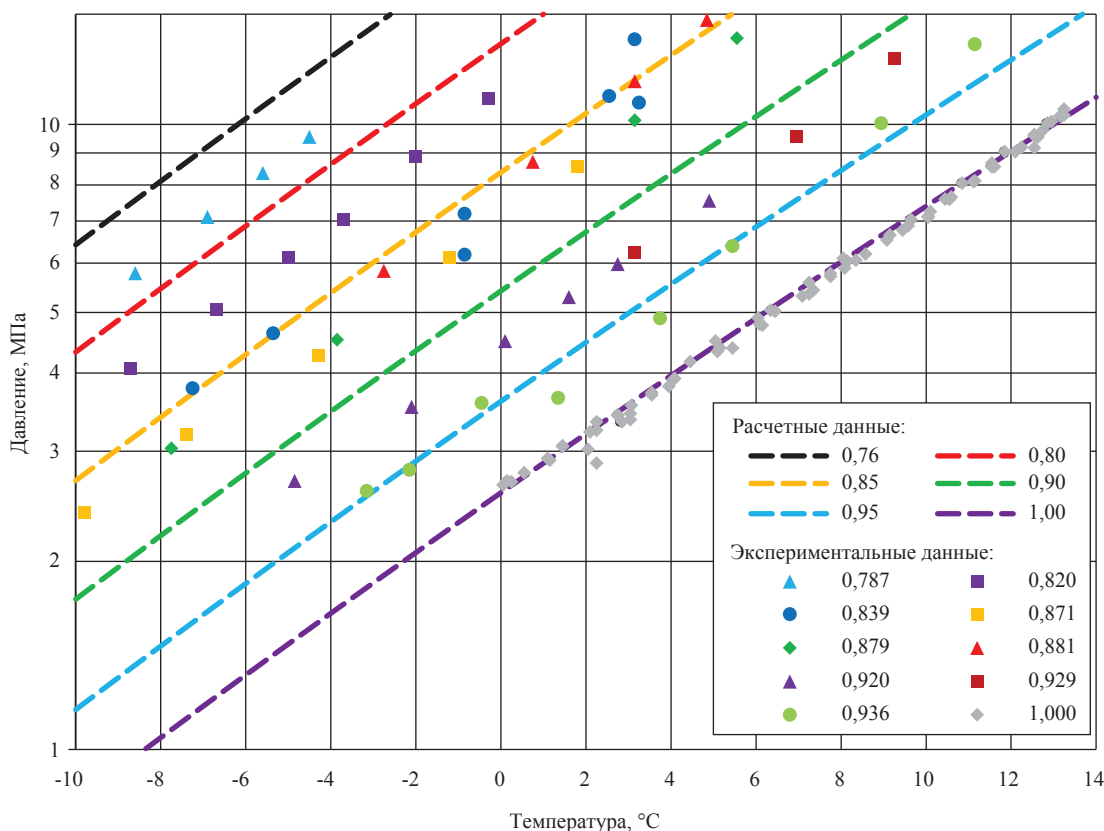


Рис. 1. Сопоставление расчетных и экспериментальных условий гидратообразования метана в присутствии растворов электролитов различной концентрации

на случай водных растворов сильных электролитов. Результаты расчета проверены на экспериментальном материале для смесей различных по составу газов, находящихся в равновесии с растворами электролитов.

Было проведено сопоставление расчетов по доработанной методике для системы «метан – вода – электролит» при давлении 9,2 МПа с экспериментальными литературными данными при давлениях, близких к 9 МПа [4–6], в растворах различной концентрации (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что методика описывает температуры гидратообразования метана при разных концентрациях растворов (различных значениях активности воды) на уровне экспериментальной погрешности, а также что при переходе от чистой воды к раствору, активность воды в котором составляет 0,76, температура гидратообразования смещается на 19–20 °С (согласуется с расчетами по соотношению (1) с погрешностью не более 1 °С). Таким образом, применительно к гидратообразованию чистого метана в растворах электролитов подтверждена хорошая согласованность экспериментальных и расчетных данных.

Далее доработанная методика расчета условий гидратообразования в водных растворах электролитов была применена для многокомпонентных газовых смесей. Условия гидратообразования в координатах «температура – давление» в зависимости от минерализации пластовой воды (и остаточной воды в коллекторе) для природных газов месторождений Южной Якутии приведены на рис. 3.

Для заданного состава газа в отсутствие минерализации при давлении 9 МПа температура гидратообразования составляет 19 °С, а при минерализации 350 г/л (активность воды – 0,69) – смещается на 26 °С. Таким образом, если поровая влага в коллекторе близка к рассолу, то газ в ботуобинских залежах месторождений Южной Якутии находится вне условий гидратообразования.

Однако еще не исключается образование и накопление гидратов в ПЗП, поскольку при дросселировании пластового газа в призабойной зоне из газа конденсируется вода с разбавлением порового раствора. При достаточно большой минерализации (выше 270 г/л) и депрессии на пласт до $\approx 2,0$ МПа не происходит полного

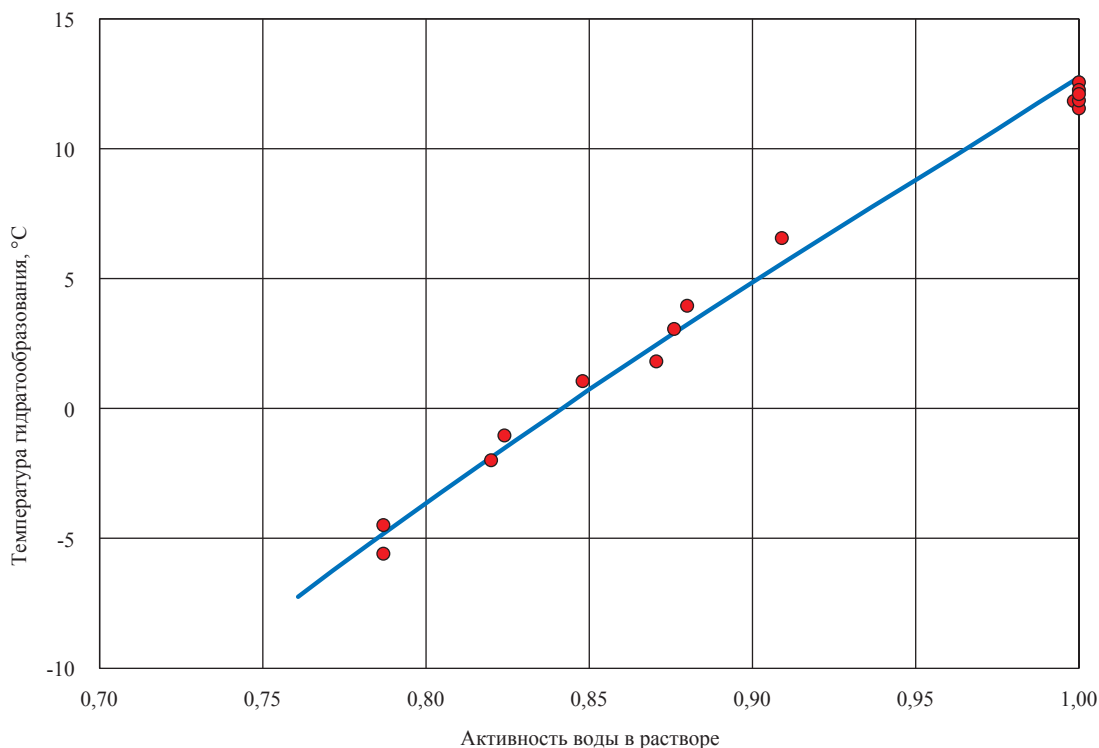


Рис. 2. Зависимость температуры гидратообразования метана от активности воды в растворе электролитов. Линия – расчетные данные при давлении 9,2 МПа по доработанной методике ООО «Газпром ВНИИГАЗ», точки – экспериментальные значения при давлениях 8,5–9,5 МПа [4–6]

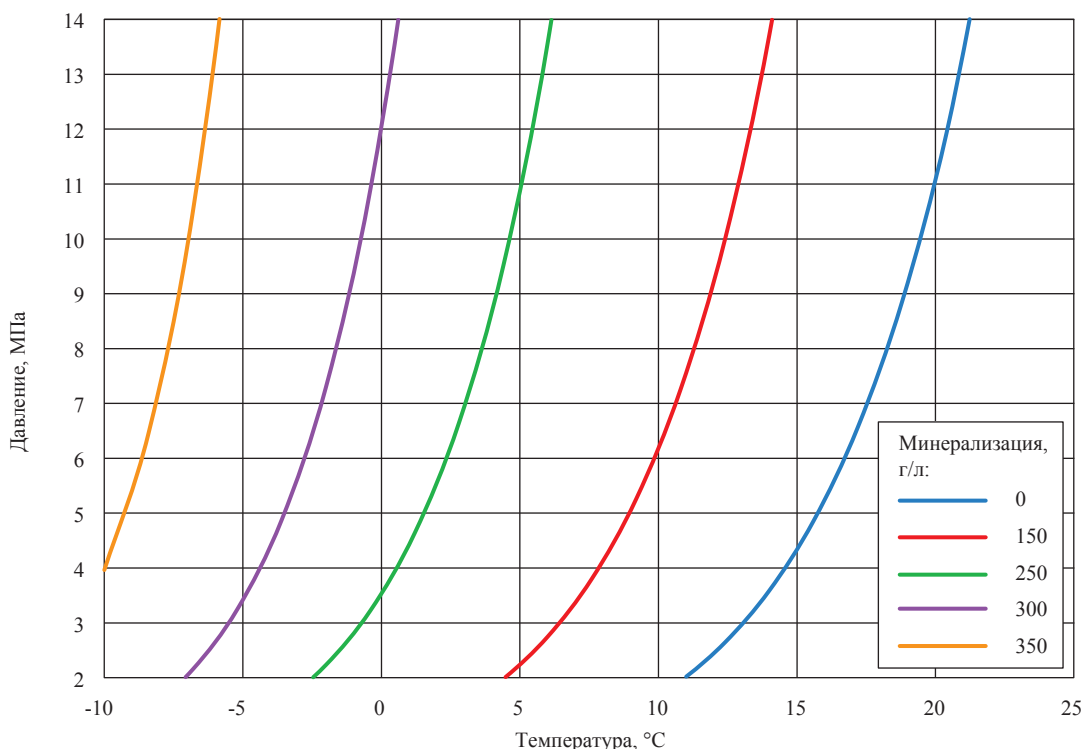


Рис. 3. Влияние минерализации пластовой воды на условия гидратообразования газа ботубинских залежей газоконденсатных месторождений Южной Якутии при различных значениях минерализации пластовой воды

разбавления порового раствора даже вблизи ствола скважины. Тем не менее эффект разбавления порового раствора «работает» на снижение величины безгидратной депрессии. Следовательно, для корректного расчета безгидратной депрессии для установившегося режима работы эксплуатационной скважины необходимо при заданных пластовых температуре и давлении совместное решение уравнений линии изоэнтальпы (т.е. линии дросселирования в координатах P, T), стационарной минерализации вдоль изоэнтальпы, а также условий гидратообразования пластового газа определенного компонентного состава с учетом влияния минерализации.

По этой схеме были проведены расчеты безгидратных депрессий для длительно работающих эксплуатационных скважин при различных пластовых температурах (рис. 4). Так, для пластовой температуры 15 °C и минерализации остаточных вод в пласте 200 г/л безгидратная депрессия не превышает 0,4 МПа. При превышении этого значения эксплуатационные скважины будут работать в гидратном режиме. При минерализации 300 г/л и выше безгидратные депрессии становятся больше 1,8 МПа, тогда как в рассолах с минерализацией, превышающей 350 г/л, опасность гидратообра-

зования еще не возникает при депрессиях до 1,6–2,0 МПа.

По результатам проведенных расчетов можно сделать вывод, что величины безгидратных депрессий в ПЗП существенно зависят от минерализации остаточных вод в пласте.

Что касается образования гидратов в стволах эксплуатационных скважин, то возможность гидратообразования здесь определяется температурным режимом скважины. Ствол скважины может оказаться в гидратном режиме, но практически только в верхней части разреза в криолитозоне. При этом гидраты будут образовываться непосредственно из паровой влаги (минуя капельную) и откладываться на внутренней поверхности лифтовой трубы. Такая ситуация (конденсация гидратов из газовой фазы) ранее не встречалась в практике газовой промышленности России. Она обусловлена пониженным влагосодержанием пластового газа, находящегося в равновесии с минерализованной остаточной водой, а также низкими пластовыми температурами.

Следует отметить, что гидратообразование в стволах эксплуатационных скважин до настоящего времени является довольно редким явлением. Так, гидратный режим в стволах сква-

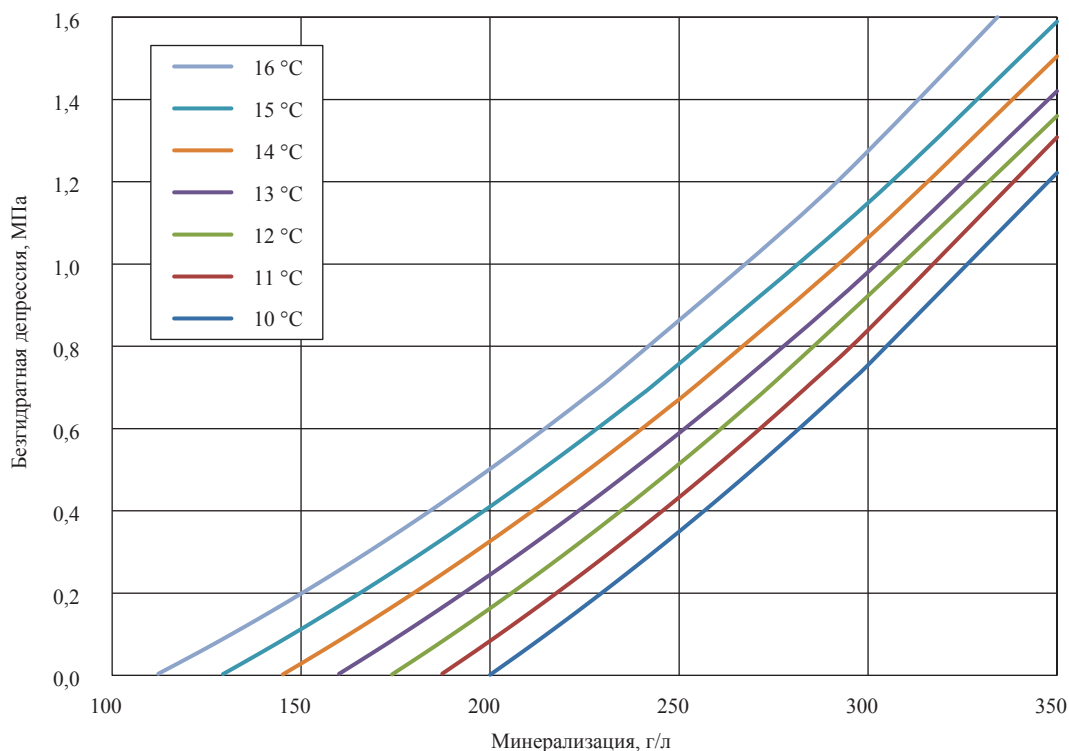


Рис. 4. Зависимость безгидратной депрессии для эксплуатационных скважин при пластовом давлении 13,24 МПа от минерализации поровых вод продуктивных горизонтов и различных пластовых температур (с учетом «эффекта разбавления»)

жин на месторождениях Западной Сибири может реализовываться только в начальный период разработки сеноманских залежей и в основном при газодинамических исследованиях скважин. В данном случае в стволе скважины вначале выпадает влага (в аэрозольном виде), а при дальнейшем движении по стволу скважины газа с каплями воды последние «загидрачиваются» при попадании системы в зону возможного гидратообразования.

Учитывая небольшой «заход в гидратную область» фазовой диаграммы при движении газа в стволе эксплуатационной скважины, принципиально возможна разработка новых подходов к ингибированию призабойной зоны, ствола скважин и систем промышленного сбора газа. Это в свою очередь требует разработки и внедрения специальных мер воздействия на околоскважинное пространство.

Рассмотрим физические свойства призабойной зоны пласта. Коллекторы многих месторождений, например терригенных отложений Западной и Восточной Сибири, преимущественно гидрофильны. В ходе строительства и освоения скважин, при ремонтах и в процессе их эксплуатации в призабойную зону попадает «техногенная вода» (из фильтрата бурового раство-

ра, жидкости вторичного вскрытия пласта, жидкости глушения, композиций химических реагентов на водной основе). Кроме того, из-за выпадения конденсационной влаги из фильтрующегося газа в процессе эксплуатации скважин увеличивается водонасыщенность ПЗП. В силу гидрофильных свойств поверхности пород коллектора вода, поступающая в прискважинную зону, достаточно прочно удерживается капиллярными силами. Со временем область, сформированная капиллярно удерживаемой водой, может значительно увеличиваться в размерах, затрудняя приток газа из пласта в скважину.

При неизотермической фильтрации газа и снижении температуры за счет изоэнтальпийного расширения газа (дресселирования) в ПЗП могут возникнуть условия гидратообразования. При работе скважины с депрессиями, превышающими безгидратные, в призабойной зоне постепенно растет гидратонасыщенность. Риск возникновения процессов гидратообразования и гидратоотложения в ПЗП для вводимых в обозримой перспективе газоконденсатных месторождений Восточной Сибири обусловлен низкими пластовыми температурами продуктивного разреза и достаточно высокими депрессиями на пласт.

Помимо соблюдения безгидратных технологических режимов эксплуатации скважин с целью предупреждения гидратообразования в ПЗП для управления динамикой гидратоотложения, по мнению авторов, целесообразно осуществление и ряда дополнительных мероприятий с целью очистки прискважинной области от кольматирующих факторов: водной (техногенной воды, а также конденсационной влаги из фильтрующегося газа) и дисперсной (частиц глины и других минеральных компонентов пород) фаз.

Для борьбы с ухудшенными фильтрационными свойствами коллекторов прискважинной зоны пласта за счет образования зоны кольматации в качестве перспективных могут рассматриваться волновые технологии [8]. Хорошо известно применение различных модификаций технологий виброакустического и ультразвукового воздействия, а также метода переменных давлений с целью восстановления и повышения продуктивности эксплуатационных скважин (интенсификации флюидоизвлечения из продуктивных пластов).

По своей физической природе *метод акустического воздействия* относится к классу слабых энергетических воздействий и, как следствие, относительно дешев по сравнению с другими методами. В среде при акустическом воздействии, как известно, происходят дегазация, кавитация, возникают акустические потоки, ускоряются процессы кристаллизации, десорбции, ряд химических реакций и т.п.

Под воздействием акустического поля в горных породах и пластах инициируется комплекс физических и физико-химических процессов, из которых наиболее изученными являются следующие:

- а) улучшение фильтрационных свойств пород за счет микросмещений, приводящих к изменению структуры пустотного пространства пород и обрабатываемых пластов в целом;
- б) дезинтеграция отдельных минеральных компонентов пород (глинистых, карбонатных и других агрегатов) и диспергирование содержащихся в пустотах пород флюидов – газа и воды;
- в) изменение минеральными компонентами пород своих поверхностных свойств (из «фильных» в «фобные»);
- г) изменение физико-химических свойств флюидов, содержащихся в пустотах пород, в частности их вязкости и газосодержания;

д) инициирование акустико-химических процессов между минеральными компонентами пород и флюидами.

Воздействие *ультразвукового волнового поля* на газожидкостные, жидкостные и твердые системы приводит к интенсификации таких физических и физико-химических процессов, как диспергирование, эмульгирование, деэмульгирование, дегазация, снижение вязкости, ускорение ионного обмена, растворение солей и др.

В отличие от других вибрационных методов ультразвуковой метод воздействия с помощью специальных генераторов ультразвука характеризуется следующими особенностями:

- создаются значительно более высокие сжимающие и растягивающие градиенты давления в масштабе, соизмеримом с размером пор;
- существует возможность локального и направленного воздействия на определенные зоны пласта как по его радиусу, так и по толщине;
- происходит совместное воздействие на пласт теплом и высокими знакопеременными градиентами давления;
- не возникают нарушения цементного камня и разрушения окружающего пласта.

За последнее время широкое применение получили также способы, создающие в коллекторах импульсные и циклические возмущения.

Перспективным является *метод переменных давлений* – метод освоения скважин путем воздействия на пласт многократных глубоких депрессий или депрессий с репрессиями. Он основан на использовании энергии пласта, проявляющейся при искусственном многократном нарушении гидродинамического равновесия системы «скважина – прискважинная зона – пласт». Технология восстановления продуктивности скважин *методом управляемых циклических депрессий* на пласт направлена на повышение производительности и освоения скважин созданием циклических депрессий на пласт с использованием установки циклического воздействия.

При мгновенной смене давлений в скважине меняется напряженно-деформированное состояние из-за смены радиального и кольцевого напряжений, что способствует раскрытию трещин либо их распространению в сторону пласта. В момент мгновенного снижения давления

или его восстановления происходит следующее: высокие градиенты давления из пласта в скважину совпадают практически во времени со снятием давления на забой, а следовательно, с отсутствием сил, прижимающих дисперсную фазу к скелету породы либо к трещинам в пласте, что облегчает вынос частиц (в том числе и воды) в скважину.

По мнению авторов, применение отмеченных выше волновых и импульсных технологий повышает надежность поддержания технологических режимов работы эксплуатационных скважин без отложения гидратов в ПЗП. Разумеется, для практической реализации указанных предложений требуется проведение детальных экспериментальных работ с последующей их адаптацией к конкретным условиям газоконденсатных месторождений. При этом просматривается технически полезный результат: очистка призабойной зоны указанными методами обеспечит приемлемые дебиты скважин за счет более низкой депрессии на пласт, а при работе на депрессиях, превышающих безгидратную, может существенно увеличиваться длительность эксплуатации скважины в режиме медленного гидратонакопления в ПЗП.

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Надсеноманские залежи Западной Сибири находятся в области термобарических условий, близких к газогидратным. Это означает возможность гидратообразования в ПЗП при рабочих дебитах эксплуатационных скважин. При этом минерализация остаточной воды в коллекторе находится на уровне 10–20 г/л. В то же время на ряде месторождений Восточной Сибири имеет место высокая минерализация остаточных вод в коллекторе при аномально низких температурах газа в продуктивных горизонтах. Несмотря на высокую минерализацию (вплоть до рассолов), из-за эффекта разбавления порового раствора конденсационной водой при дросселировании газа в ПЗП здесь также не исключается возможность гидратоотложения в ПЗП при рабочих депрессиях на пласт.

Поэтому для ряда новых месторождений Западной и Восточной Сибири требуется разработка специальных мер воздействия на призабойную зону, позволяющих снизить риски гидратоотложения и увеличить длительность работы скважин при сохранении приемлемых дебитов. Для управления динамикой гидратоотложения в ПЗП помимо соблюдения безгидратных технологических режимов эксплуатации скважин целесообразно применение методов воздействия на ПЗП с целью ее очистки от колюматизирующих факторов.

Список литературы

1. Воды нефтяных и газовых месторождений СССР: Справочник / под ред. Л.М. Зорькина. – М.: Недра, 1989. – 382 с.
2. Фролов Ю.Г. Элементы теории смешанных изоактивных растворов электролитов / Ю.Г. Фролов // Успехи химии. – 1981. – Т. 3. – С. 429–459.
3. de Roo J.L. Occurrence of Methane Hydrate in Saturated and Unsaturated Solutions of Sodium Chloride and Water in Dependence of Temperature and Pressure / J.L. de Roo, C.J. Peters, R.N. Lichtenthaler et. al // AIChE Journal. – 1983. – V. 29. – P. 651–657.
4. Sloan E.D. Clathrate Hydrates of Natural Gases. Third Edition / E.D. Sloan, C.A. Koh. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. – 722 p.
5. Zuo Y.-X. Prediction of Gas Hydrate Formation Conditions in Aqueous Solutions of Single and Mixed Electrolytes / Y.-X. Zuo, E.H. Stenby // SPE Journal. – 1997. – V. 2. – P. 406–416.
6. Atik Z. Experimental Gas Hydrate Dissociation Pressures for Pure Methane in Aqueous Solutions of $MgCl_2$ and $CaCl_2$, and for a (Methane + Ethane) Gas Mixture in an Aqueous Solution of ($NaCl + MgCl_2$) / Z. Atik, Ch. Windmeier, L.R. Oellrich // J. Chem. Eng. – 2006. – V. 51. – P. 1862–1867.
7. Истомин В.А. Методика и результаты расчета двухфазных равновесий природного газа с конденсированной водной фазой / В.А. Истомин, В.Г. Квон // Актуальные проблемы освоения газовых месторождений Крайнего Севера. – М.: ВНИИГАЗ, 1995. – С. 180–204.
8. Мельников В.Б. Перспективы применения волновых технологий в нефтегазовой отрасли / В.Б. Мельников. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2007. – С. 27.