

УДК 622.279.23:665.632 + 622.279.23

**В.А. Истомина, Д.М. Федулов**

## Термодинамика призабойной зоны пласта с учетом минерализации остаточной воды в коллекторе и возможности гидратообразования

**Ключевые слова:** призабойная зона пласта, гидратообразование, минерализация пластовой воды, гидратообразование в призабойной зоне пласта.

**Keywords:** near wellbore formation, hydrate formation, formation water mineralization, hydrates in the near wellbore formation.

На многих месторождениях Восточной Сибири имеет место высокая минерализация остаточной воды в коллекторе [1]. Несмотря на то, что минерализованная вода является ингибитором гидратообразования, на месторождениях Южной Якутии не исключается возможность гидратообразования в призабойной зоне пласта (ПЗП) из-за аномально низких пластовых температур. В работе рассматриваются особенности термодинамики ПЗП при минерализации остаточных вод и возможности гидратообразования применительно к газоконденсатным месторождениям Южной Якутии.

Хорошо известно, что в ПЗП происходит дросселирование флюида, т.е. имеет место неизотермическая фильтрация. Неизотермическая фильтрация газа и нефти исследована в классических работах Б.Б. Лапука [2], И.А. Чарного [3], Э.Б. Чекалюка [4] и их последователей [5–8]. Под дросселированием в технической термодинамике понимается идеализированный процесс бесконечно медленного движения (фильтрации) флюида через пористую перегородку между двумя резервуарами с разными давлениями. В нефтегазовой отрасли стационарный (точнее, квазистационарный) процесс фильтрации газонефтеконденсатной флюидальной системы в окрестности скважины рассматривается именно как дросселирование флюида при сохранении его энтальпии. При этом следует иметь в виду, что имеется несколько отличий неизотермического течения природного газа в призабойной зоне от процесса дросселирования, обсуждаемого в прикладной термодинамике. Кратко рассмотрим эти отличия.

1. В начальный период (после включения скважины в работу или при изменении ее дебита) процесс течения газа в ПЗП является нестационарным, причем достаточно быстро устанавливается квазистационарный режим по давлению. Поскольку имеет место теплообмен газа со скелетом (коллектором) и вмещающими флюидами (в данном случае – засоленной остаточной влагой), то температурный режим устанавливается за более длительное время. В коллекторах низкой проницаемости время выхода на квазистационарный термобарический режим может быть достаточно большим (несколько суток). Тогда как для коллекторов газоконденсатных месторождений Южной Якутии характерное время установления стационарного термобарического режима составляет несколько часов (судя по усредненным величинам проницаемости керна с учетом опыта исследований газовых скважин на стационарных режимах).

2. Имеют место фазовые превращения – выпадение из дросселирующегося газа конденсационной влаги (или гидратов), а также нестабильного углеводородного конденсата. Эти процессы сопровождаются изменением температуры фильтрующегося газа. Из-за малого удельного количества конденсационной воды на месторождениях Южной Якутии оказывается возможным пренебречь тепловым эффектом конденсации водной фазы из газа при его неизотермической фильтрации. Это было проверено сопоставительными термодинамическими расчетами изоэнтальпийного расширения природного газа при наличии конденсирующихся паров воды в газе и при их отсутствии.

3. Некоторое отличие неизотермического течения газа в ПЗП от процесса дросселирования связано с возрастанием скорости газового потока в призабойной зоне и выходе в ствол скважины. Простые оценки показывают, что изменение кинетической энергии флюида в ПЗП незначительно влияет на его температуру.

4. Наличие неоднородности коллектора и перфорационных отверстий. При безгидратном режиме эксплуатации скважины эти факторы не оказывают какого-либо заметного влияния на температуру разных участков забоя из-за близости давлений. Тогда как при гидратном режиме необходим учет особенностей локального дросселирования газа в окрестности перфорационных отверстий, что представляется существенным при создании реалистичных математических моделей гидратоаккумуляции в ПЗП.

Таким образом, процесс неизотермического течения природного газа с учетом изменения скорости потока и фазовых превращений (конденсации воды, выпадения углеводородного конденсата) в первом приближении является изохлальной. Более точно его можно рассматривать как политропный с показателем политропы, близким к показателю изохлальности.

Традиционное допущение теории разработки газовых и газоконденсатных месторождений – неподвижность остаточной влаги при фильтрации газа в пласте – в ПЗП нарушается. В ходе эксплуатации скважины призабойная зона постепенно увлажняется выше порога начала подвижности воды, при этом «в среднем» устанавливается стационарное распределение влагонасыщенности порового пространства в радиальном направлении от скважины. Это означает, что через некоторое время вся выпадающая в ПЗП конденсационная вода в ней уже не задерживается, а фильтруется вместе с газом и выносится на забой скважины. Говоря «в среднем», мы имеем в виду, что при некоторых режимах фильтрации не исключается возникновение пульсационного (автоколебательного) процесса с периодическим выносом части жидкой поровой влаги на забой скважины.

Другая особенность фильтрации газа в присутствии остаточной воды в коллекторе – некоторое изменение конфигурационного расположения влаги в поровом пространстве при увеличении дебита скважины. Двигающийся газ как бы формирует «под собой» фильтрационные каналы, а при повышенных депрессиях на пласт обеспечивает частичный вынос воды в первую очередь из крупных пор на забой скважины, оттесняя оставшуюся воду в более мелкие поры. Причина выноса влаги в основном из крупных пор связана с различными скоростями газа в порах разного размера. В исследованиях на керне реализация такой схемы течения может проявляться в виде нелинейности закона

фильтрации по газу. Недавно по этому направлению исследований была опубликована принципиально важная монография С.Е. Ершова, Д.И. Иванова и М.П. Хайдиной [8], в которой, в частности, обсуждается модель С.Е. Ершова и Ю.П. Коротаева так называемого «псевдоначального градиента» по газу с учетом концевоего эффекта в присутствии капиллярно удерживаемой в керне жидкой фазы (воды).

Рассмотрим качественные физические представления о неизотермической фильтрации газа при наличии в поровом пространстве пресной воды (как без образования, так и с образованием гидратов в ПЗП). Исходный термобарический режим залежи предполагается достаточно близким к гидратному, но в самом пласте газовые гидраты отсутствуют (т.е. температура пласта несколько выше температуры гидратообразования). В то же время в призабойной зоне предполагается возможным процесс гидратообразования при определенных режимах работы эксплуатационных скважин (при депрессиях на пласт, превышающих безгидратную депрессию).

Пусть в некоторый момент времени скважина включается в работу, а в призабойной зоне первоначально имеет место равномерное распределение насыщенности пористой среды влагой по радиусу от скважины. Через небольшой промежуток времени формируется квазистационарное распределение давления вокруг скважины (депресссионная воронка). Несколько позже устанавливается квазистационарный температурный режим, т.е. прекращается теплообмен между фильтрующимся газом, скелетом и остаточной водой (в работе [4] отмечено, что при квазистационарном режиме можно пренебречь эффектами, связанными с кондуктивной теплопроводностью). Таким образом, устанавливается квазистационарное термобарическое поле в окрестности скважины – термодепрессионная воронка. По проведенным авторами оценкам, характерное время его установления составляет не более нескольких суток в силу относительно высоких проницаемостей пород месторождений Южной Якутии. Для низкопроницаемых коллекторов данный вопрос требует специального расчетного исследования. Квазистационарная термодепрессионная воронка медленно эволюционирует за счет «движения контура питания» вокруг скважины (до того момента, пока контур питания не остановится). Термодепрессионная воронка

является следствием изохэнтальной течения газа.

Из дросселирующегося газа в призабойной зоне пласта выпадает влага, и через некоторое время формируется стационарное распределение влагонасыщенности в радиальном направлении. В каждой точке призабойной зоны устанавливается свое пороговое значение влагонасыщенности, зависящее от скорости фильтрации газа. Вопрос о пороговых значениях влагонасыщенности требует специального экспериментального изучения. Здесь возникает задача длительности достижения стационарной влагонасыщенности порового пространства. Конденсационная влага продолжает выпадать из фильтрующегося газа, но не остается неподвижной в поровом пространстве, а фильтруется вместе с газом с последующим выносом на забой скважины (а при достаточно высоких дебитах – и на устье скважины). Механизм фильтрации выделяющейся из газа влаги (при объемном ее выделении в силу дроссельного эффекта) не вполне известен и, вероятно, отличается от механизма совместной фильтрации газа и воды при отсутствии конденсации. Можно выделить два аспекта – двухфазное течение газа с распределенными в газе микро(нано)каплями воды и пленочное течение жидкой влаги. Удельное количество выносимой на забой жидкости определяется по влагосодержанию газа в пласте и на забое скважины. При этом можно сделать допущение о квазиравновесном выпадении влаги из газовой фазы, поскольку процесс ее конденсации растянут по всей призабойной зоне. Это допущение, по-видимому, не вполне корректно только вблизи радиуса скважины ( $R_{скв}$ ), т.е. при выходе газа на забой. Имеется в виду, что часть паров воды не успевает конденсироваться в пористую среду, т.е. газ может выходить на забой с некоторой (небольшой) пересыщенностью по парам воды.

Если фактическая депрессия на пласт превышает безгидратную депрессию, то по связи температуры и давления дросселирующегося газа (или, иначе говоря, по изменению температуры и давления «вдоль изохэнталы») и условиям гидратообразования газа конкретного состава) определяется радиус зоны гидратообразования ( $R_c$ ) вокруг скважины (здесь и далее для простоты рассуждений имеется в виду одномерная плоско-радиальная модель фильтрации газа вокруг скважины). В цилиндрическом слое  $R_c - R_{скв}$  вокруг скважины возможно обра-

зование газовых гидратов и их постепенное накопление в порах коллектора. Но из-за сильной крутизны депрессионной воронки для осесимметричной фильтрационной задачи ширина зоны гидратообразования ( $R_c - R_{скв}$ ) при разумных депрессиях может составить только десятки сантиметров. Первоначально в процесс гидратообразования включается имеющаяся в зоне  $R_c - R_{скв}$  остаточная поровая влага, причем она не сразу переходит в гидрат из-за появления газогидратной пленки на поверхности воды. После начальной стадии гидратообразования газовойодяной контакт блокируется гидратным слоем, и процесс замедляется: вода, находящаяся между гидратом и частицами породы, некоторое время остается «незагидратченной». Но в конечном счете останется только пленочная влага, поскольку ее химический потенциал ниже, чем потенциал объемной фазы воды. Определение количества такой пленочной воды как функции давления и температуры гидратообразующего газа может быть сделано расчетным путем с использованием экспериментальных данных по потенциалу поровой влаги (активности поровой воды от влагонасыщенности зерна). Оценить время перехода в гидратное состояние практически всей поровой влаги в зоне  $R_c - R_{скв}$  теоретическим путем (без специальных экспериментов) довольно затруднительно.

Процесс гидратоотложения в зоне  $R_c - R_{скв}$  продолжается посредством двух механизмов. Во-первых, за счет конденсации в этой зоне паров воды из газа непосредственно в гидратную фазу. Во-вторых, за счет фильтрующейся совместно с газом из дальних участков призабойной зоны жидкой воды, которая ранее сконденсировалась из газа. В первом приближении можно допустить, что фильтрующаяся вода, достигнув зоны  $R_c - R_{скв}$ , переходит в гидраты полностью и остается в твердой фазе в порах коллектора.

Таким образом, схематически выделяем две стадии процесса гидратоотложения в ПЗП при заданной депрессии на пласт, превышающей безгидратную депрессию. На первой стадии коллектор дальней части призабойной зоны  $R > R_c$  постепенно насыщается конденсационной водой, но вода в ней еще неподвижна. При этом процесс гидратообразования с самого начала происходит в ближней зоне  $R_c - R_{скв}$  посредством конденсации паров воды из газа непосредственно в газогидрат-

ную фазу. Параллельно и своя исходная поровая влага зоны  $R_c - R_{скг}$  переходит в гидратное состояние. Процесс гидратообразования на этой стадии достаточно медленный, так как в гидраты превращается только масса сконденсировавшейся из газа воды, определяемой по разности равновесного влагосодержания газа между точками  $R_c$  и  $R_{скг}$ . На второй стадии поровая вода из дальней призабойной зоны  $R > R_c$  достигает порога подвижности и начинает фильтроваться в ближнюю зону, где и переходит в гидратную фазу. Таким образом, процесс тампонирувания гидратами зоны  $R_c - R_{скг}$  первоначально идет медленно, а затем постепенно самоускоряется, поскольку вся выделяющаяся из газа в призабойной зоне конденсационная вода начинает «работать» на тампонирувание гидратами очень узкой зоны в окрестности  $R_c$ . При постоянной депрессии на пласт и достижении величины гидратонасыщенности порового пространства вблизи  $R_c$  на уровне 40–60 % дебит скважины начинает резко падать. Так, для надсеноманских (туронских) залежей Западной Сибири, для которых имеет место высокая начальная влагонасыщенность пород коллектора, можно дать оценку снизу времени возможной эксплуатации скважины в гидратном режиме, допуская, что вторая стадия процесса начинается практически сразу. Тогда как для пластов с очень низкой начальной влагонасыщенностью (для месторождений Южной Якутии) необходимо оценивать и длительность первой (медленной) стадии, но здесь следует учитывать высокую минерализацию остаточной влаги в коллекторе.

Предложенная выше для случая пресной поровой воды в коллекторе физическая модель гидратообразования и гидратообразования в ПЗП является более полной, чем представленные в литературе [5, 9], и имеет существенные отличия – наличие двух стадий и постепенное самоускорение процесса. Следует отметить, что и эта (более полная) физическая модель является лишь некоторым приближением. Для ее дальнейшей конкретизации необходимы как специальные экспериментальные исследования, так и численное моделирование отдельных составляющих элементов.

Переходим к описанию термодинамики ПЗП при наличии минерализации остаточной влаги в коллекторе. Прежде всего рассмотрим качественные отличия конденсации влаги из газа от случая с пресной остаточной влагой,

а также особенности гидратообразования и гидратообразования в ПЗП. Наличие минерализации остаточной влаги в коллекторе меняет физическую картину процесса конденсации влаги из дросселирующегося газа. Отличие связано с тем, что пластовый газ, находящийся в равновесии с поровой минерализованной водой, оказывается недонасыщенным влагой по отношению к пресной воде.

В первую очередь рассмотрим случай небольшой минерализации остаточной влаги в коллекторе. В начальный период времени, после включения (с заданной депрессией на пласт) скважины в работу, конденсирующаяся из газа влага вдали от скважины постепенно разбавляет поровый раствор. Причем процесс разбавления остаточной воды в коллекторе в каждой точке ПЗП с определенными термобарическими условиями заканчивается по достижении равновесного состояния с фильтрующимся газом (чем ниже давление дросселирующегося газа в рассматриваемой точке, тем ниже концентрация солей в поровой влаге). Таким образом, через некоторое время возникает стационарное распределение минерализации влаги порового пространства ПЗП вплоть до нулевой концентрации на некотором расстоянии  $R_g$  от скважины. Следует отметить, что данное стационарное состояние устойчиво: оно поддерживается течением дросселирующегося природного газа (с заданной депрессией на пласт) и исходным влагосодержанием газа в пластовых условиях. После установления стационарного распределения концентрации солей в поровом растворе вдоль радиуса скважины в зоне  $R > R_g$  влага вообще перестает выделяться из газа, т.е. влагосодержание пластового газа на этом участке перестает изменяться. Тогда как в ближней от скважины зоне конденсации водяных паров ( $R_g - R_{скг}$ ) по термодинамическим соображениям влага из газа должна конденсироваться постоянно, поэтому поровый раствор постепенно полностью опреснится (разумеется, процесс опреснения будет протекать параллельно с процессом фильтрации конденсирующейся воды при достижении пороговой влагонасыщенности). После полного опреснения порового раствора на участке  $R_g - R_{скг}$  конденсация влаги из газа будет продолжаться.

Таким образом, призабойная зона скважины подразделяется на два участка: дальний ( $R > R_g$ ), где влага из газа через некоторый

промежуток времени перестает конденсироваться (реализуется стационарное распределение концентрации солей в водном растворе), и ближний ( $R_g - R_{скв}$ ), где влага из газа постоянно конденсируется (а соли постепенно оказываются полностью «отмытыми» из поровой влаги коллектора).

При увеличении депрессии на пласт система может войти в область гидратообразования. При этом зона  $R_g - R_{скв}$  в свою очередь разделится на две подзоны: конденсации жидкой воды ( $R_g - R_c$ ) и конденсации газового гидрата ( $R_c - R_{скв}$ ). В зоне  $R_g - R_{скв}$  фактически реализуется вышеописанный случай пресной поровой влаги, поскольку с течением времени поровый раствор полностью опреснится. Однако здесь имеет место своеобразная начальная стадия процесса гидратообразования, который начинается вблизи  $R_{скв}$  и постепенно распространяется по зоне  $R_c - R_{скв}$  в ходе разбавления конденсационной водой порового раствора, тогда как для пресного раствора этот процесс начинается сразу по всей зоне  $R_c - R_{скв}$ .

Таким образом, для слабоминерализованной остаточной влаги в коллекторе полностью сохраняются введенные в 1970-е гг. применительно к пресной влаге в ПЗП понятия «безгидратная депрессия» и «безгидратный дебит» скважины. Однако возникают два новых момента относительно конденсации паров воды из газа и гидратообразования в ПЗП:

1) наличие дальней зоны  $R > R_g$ , в которой после установления стационарного состояния концентрация солей в поровом растворе меняется от максимального значения (в пласте) до нуля (при  $R = R_g$ ). В этой зоне влага из газа перестает выпадать после установления стационарного режима минерализации порового раствора. В то же время в ближней зоне  $R < R_g$  из дросселирующегося газа постоянно конденсируется влага;

2) для слабоминерализованной остаточной влаги в коллекторе при депрессии на пласт, превышающей безгидратную, реализуется условие  $R_g > R_c$ . Это означает, что вдоль линии дросселирования газа (вдоль изоэнтальпы) при  $R_c < R < R_g$  выпадает жидкая вода, а при  $R < R_c$  из газа конденсируются сразу гидраты. При этом зона  $R_c - R_{скв}$  формируется постепенно с выходом на стационарный водно-солевой режим, поскольку параллельно реализуется и «процесс разбавления», т.е. уменьшения концентрации солей в поровой влаге.

Приведенная выше ситуация характерна для надсеноманских залежей Западной Сибири с небольшой минерализацией пластовых и остаточных вод (на уровне 15–20 г/л). Например, для туронских залежей Южно-Русского месторождения в районе экспериментальной скважины (см. обсуждение опыта эксплуатации этой скважины в работе [10]) пластовая температура, по оценкам авторов, составляет 17,0–17,5 °С при пластовом давлении 9,7 МПа, что только на 2 °С выше условий гидратообразования. Поэтому даже небольшая депрессия на пласт приводит к гидратообразованию в призабойной зоне. Подчеркнем, что зону гидратообразования в данном случае следует определять без учета минерализации остаточной воды (из-за постепенного опреснения остаточной воды в ПЗП).

Далее переходим к рассмотрению качественно нового случая сильно минерализованной остаточной воды в продуктивном горизонте, характерном для месторождений Южной Якутии, подготавливаемых в настоящее время к промышленному освоению. Если бы минерализация остаточной влаги в коллекторах отсутствовала, то такие месторождения оказались бы газогидратными из-за аномально низкой пластовой температуры.

Прежде всего отметим, что если депрессия на такой пласт недостаточно большая, то точка  $R_g$  в призабойной зоне может и не реализоваться. Иначе говоря, при достижении стационарного состояния засоленность остаточной влаги вдоль радиуса от скважины будет меняться от начального максимального значения (в пласте, вдали от скважины) до некоторого минимального значения на выходе в ствол скважины (в точке  $R = R_{скв}$ ). Как показал проведенный авторами термодинамический анализ, именно такая ситуация, по всей вероятности, и будет иметь место на эксплуатационных скважинах месторождений Южной Якутии при депрессиях на пласт на уровне 0,5–1,0 МПа. Это означает, что после некоторого времени пары воды из газа в призабойной зоне вообще перестают конденсироваться. Таким образом, пластовый газ будет выходить на забой скважины со своим исходным пластовым влагосодержанием. Но газ остается недонасыщенным по парам воды по отношению к пресной жидкой воде, поскольку перед выходом на забой он находился в равновесии с водным раствором некоторой засоленности.

При увеличении депрессии на пласт (пока отвлекаясь от возможности гидратообразования) в ПЗП должна появиться точка  $R_g$ , а в зоне  $R < R_g$  будет постоянно конденсироваться влага из фильтрующегося газа. Казалось бы, данный случай при больших депрессиях на пласт сводится к вышерассмотренному случаю слабой минерализации порового раствора. Однако принципиально важно учесть возможность гидратообразования, поскольку точка конденсации паров воды из газа непосредственно в гидрат ( $R_c$ ) здесь располагается раньше гипотетической (т.е. не реализуемой в данном случае) точки  $R_g$ . Таким образом, при учете возможности гидратообразования в ПЗП выделяются две зоны – дальняя зона ( $R > R_c$ ), в которой устанавливается стационарное распределение минерализации порового раствора коллектора от максимальной величины вдали от скважины до некоторого значения при  $R_c$ , и ближняя ( $R_c - R_{скв}$ ), где реализуется процесс выпадения гидратов (гидратонакопления) из паровой влаги. В зоне  $R_c - R_{скв}$  устанавливается свое стационарное распределение минерализации порового раствора, причем при  $R = R_{скв}$  минерализация порового раствора остается некоторой конечной величиной. Таким образом, устанавливается стационарное распределение концентрации солей как функция расстояния от скважины в поровом растворе от максимального (первоначального) вдали от скважины до минимального при выходе на забой, но в точке  $R = R_c$  имеет место излом этой функции. Таким образом, для случая сильноминерализованной влаги в коллекторе ПЗП принципиально сохраняются понятия «безгидратная депрессия» и «безгидратный дебит скважины» (но их расчет становится более сложной задачей). При этом добавляется понятие «безгидратное время», поскольку до начала гидратообразования должен пройти процесс разбавления порового минерализованного раствора. Для условий месторождений Южной Якутии, по оценкам авторов, безгидратное время может составить от нескольких недель до нескольких месяцев в зависимости от депрессии на пласт, дебита скважины и начальной минерализации остаточной воды в коллекторе ПЗП.

Проведенное выше строгое термодинамическое рассмотрение следует дополнить качественными гидрогазодинамическими соображениями. Рассмотрим в самых общих чертах несколько упрощенных моделей движения

газа в поровом пространстве призабойной зоны (в различных по размерам порах).

*Первая модель* (самая простая) – неизотермическое течение газа в крупных порах, из которых газ полностью выдувает (выносит) минерализованную воду. Напомним, что в рассматриваемом случае пластовый газ недонасыщен по влаге (точки росы пластового газа как по гидратам, так и по метастабильной воде ниже, чем температура газа в залежи). Это означает, что при изохлальной течи газа по «осушенной поре» на значительном участке призабойной зоны вообще не будет выпадения конденсационной влаги из пластового газа. При определенном снижении забойного давления достигается точка росы газа по гидратам (в каких депрессиях на пласт это произойдет, зависит от исходной минерализации порового раствора в пласте). Начиная с «гидратной точки» при  $R < R_c$  непосредственно в потоке газа в данной поре начнут конденсироваться гидраты, причем они могут откладываться на стенках поры. Следовательно, в данной схеме течения газа полностью сохраняются понятия «безгидратная депрессия» и «безгидратный дебит». Расчет величины безгидратной депрессии основывается на определении места нахождения гидратной точки на линии изохлалы (температуры и давления начала выпадения гидратов при заданном влагосодержании пластового газа). Разность между пластовым давлением и давлением в гидратной точке и будет (максимально возможной) величиной безгидратной депрессии ( $\Delta p_c$ ). При депрессии на пласт ( $\Delta p$ ), большей  $\Delta p_c$  (т.е. при  $\Delta p > \Delta p_c$ ), в ПЗП будут выпадать гидраты. Однако в этой схеме течения не возникает понятия «безгидратное время» (так как оно равно нулю). Разумеется, причина отсутствия безгидратного времени связана с исходным допущением мгновенного выдувания из поры остаточной минерализованной влаги.

*Вторая модель* – движение газа по более мелким порам, стенки которых, а также самые маленькие поры содержат остаточную минерализованную воду. Снова рассмотрим процесс вдоль изохлалы. Здесь по мере снижения давления из газа сразу начинает конденсироваться вода и уменьшаться минерализация поровой влаги (идет процесс разбавления). При каждом давлении газа (вдоль изохлалы) это разбавление доходит до некоторого значения и останавливается по достижении равновесия между газом и минерализованным

водным раствором. Разумеется, вблизи границы «газ – вода» стационарное значение концентрации достигается достаточно быстро, далее процесс протекает по диффузионному механизму (с медленным разбавлением минерализованного раствора в застойных зонах). В конечном счете в каждой точке линии изоэнтальпы устанавливается стационарное распределение концентрации солей в водном растворе, вплоть до гидратной точки. Другими словами, при достижении стационарного состояния влага из газа перестает конденсироваться в дальней зоне от пласта вплоть до гидратной точки. После прохождения гидратной точки и до забоя (а в этой зоне пары воды конденсируются сразу в гидратную фазу) постепенно устанавливается свое равновесное распределение концентрации солей. В зоне от гидратной точки до забоя гидраты выпадают непосредственно из газовой фазы (постепенно закупоривая призабойную зону), причем они равновесно сосуществуют с поровым раствором электролита (с определенной концентрацией солей в каждой точке изоэнтальпы). Необходимо отметить, что до момента начала выпадения гидратов проходит определенное время, т.е. возникает понятие «безгидратное время» разбавления засоленного порового раствора.

*Третья модель* – присутствие изначально твердой фазы (соли) в поровом пространстве коллектора, находящейся в равновесии с минерализованным раствором. Нетрудно заметить, что третий случай формально сводится ко второму, только время разбавления увеличивается, так как соль постепенно растворяется, поддерживая высокую минерализацию раствора. Однако здесь появляется и практически важный дополнительный момент – увеличение проницаемости коллектора из-за растворения соли в его порах, который требует специального экспериментального изучения.

Еще раз отметим, что из вышеприведенного термодинамического и качественного гидрогазодинамического анализа следует, что при термобарических условиях в продуктивных горизонтах, характерных для месторождений Южной Якутии, при наличии высокой минерализации остаточной влаги процесс гидратообразования в ПЗП возможен только по механизму конденсации паров воды из газа непосредственно в гидратную фазу (с отложением гидратов в поровом пространстве коллектора в окрестности забоя скважины).

Приведем результаты расчетов температур точек росы по воде и гидратам для фильтрации газа по поровому пространству ПЗП, заполненному остаточной водой с некоторой начальной минерализацией.

Исходные данные для расчета:

1) пластовая температура – 15 °С; пластовое давление – 13,2 МПа; задан состав пластового газа, характерный для ботубинских горизонтов месторождений Южной Якутии;

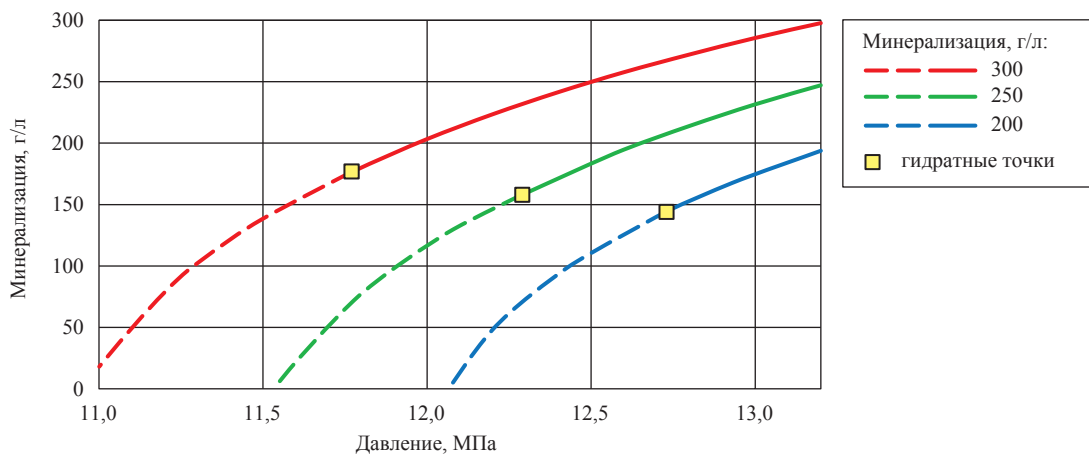
2) при движении газа в ПЗП происходит изоэнтальпийное снижение давления с 13,2 до 10,2 МПа, при этом температура газа снижается с 15 до 5,1 °С;

3) заданы три значения начальной минерализации остаточной воды в коллекторе – 200, 250 и 300 г/л.

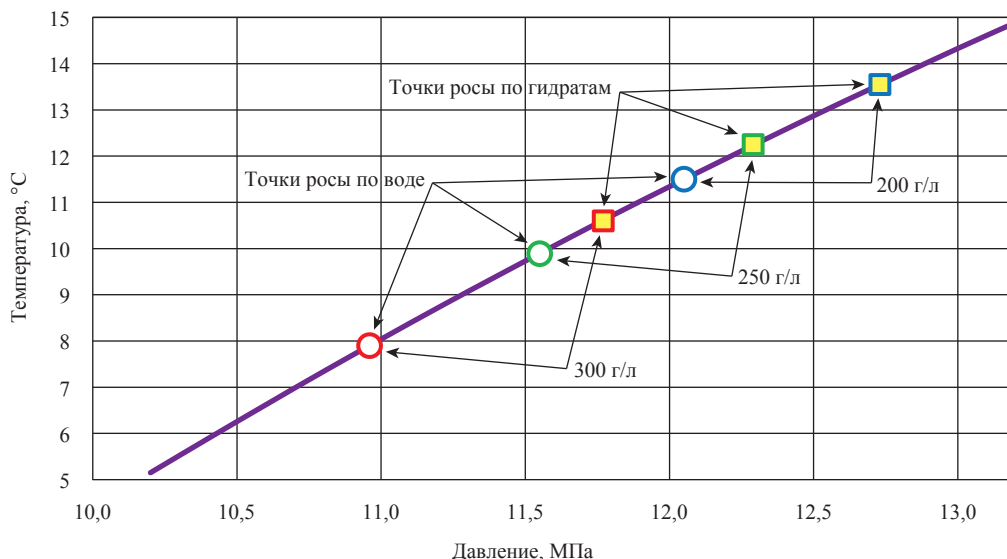
В расчетах пренебрегаем тепловыми эффектами, связанными с разбавлением минерализованной воды, а также с изменением растворимости пластового газа в водной фазе.

Вдоль изоэнтальпы происходят конденсация воды из газа и разбавление минерализованной поровой влаги конденсационной водой до достижения стационарного значения (рис. 1), т.е. в радиальном направлении устанавливается некоторая стационарная концентрация солей в поровом растворе, которая меняется от начальной пластовой вплоть до 0 г/л. Давление газа, при котором поровый раствор оказывается полностью опресненным, зависит от начальной минерализации и, например, для 250 г/л составляет 11,55 МПа. При дальнейшем уменьшении давления (т.е. при увеличении депрессии на пласт) поровый раствор остается в соответствующих точках изоэнтальпы полностью опресненным. Если же при начальной минерализации остаточной воды в коллекторе 250 г/л давление газа на забое выше 11,55 МПа, то в коллекторе при  $R = R_{скв}$  сохранится некоторая стационарная минерализация порового раствора. Например, согласно данным рис. 1, при забойном давлении 11,9 МПа остаточная минерализация составит 100 г/л.

На рис. 2 на рассматриваемой изоэнтальпе выделена область точек росы по воде и гидратам в зависимости от минерализации. Если исходная минерализация воды в пласте – 250 г/л, то гидраты в призабойной зоне появляются при снижении давления до 12,05 МПа и температуре 11,5 °С, т.е. при депрессиях на пласт более 1,2 МПа. В то же время точка росы газа по воде соответствует температуре 10,5 °С и дав-



**Рис. 1. Изменение стационарной концентрации солей в поровой воде при изоэнтальпийном снижении давления газа и различных значениях минерализации остаточной воды в пласте (температура пласта – 15 °С, пластовое давление – 13,2 МПа)**



**Рис. 2. Линия изоэнтальпы газа (температура пласта – 15 °С, пластовое давление – 13,2 МПа) и точки росы газа по гидратам (квадраты) и воде (кружки) при различной начальной минерализации остаточной воды в коллекторе**

лению 11,8 МПа. Таким образом, при движении газа вдоль изоэнтальпы точка росы по гидратам появляется раньше точки росы по жидкой воде. Как показали проведенные авторами расчеты, в диапазоне пластовых температур 10–15 °С имеет место достаточно слабая зависимость безгидратной депрессии от температуры.

Проведенные расчеты стационарного распределения концентрации солей в поровом растворе в радиальном направлении (вдоль изоэнтальпы) в зависимости от депрессии на пласт позволяют непосредственно перейти к расчетам безгидратных депрессий для длительно работающих эксплуатационных скважин [11].

Таким образом, выше предложены термодинамически обоснованные модели конденса-

ции и фильтрации влаги при неизотермическом течении газа с учетом различной минерализации поровой влаги и возможности гидратообразования в ПЗП.

Для случая пресной остаточной воды в коллекторе представлена более полная (по сравнению с известной в литературе) модель образования и накопления газовых гидратов в ПЗП. В рамках этой модели при дросселировании газа в ПЗП гидраты в зоне гидратообразования накапливаются как конденсацией паров воды непосредственно в гидрат, так и посредством фильтрации жидкой воды из более дальней от скважины зоны и ее последующего «загидративания». Для случая слабоминерализованной остаточной воды в коллекторе в окрестности



скважины происходит полное опреснение порового раствора. Поэтому при расчетах безгидратной депрессии на пласт здесь не нужно учитывать влияние минерализации остаточной воды на условия гидратообразования.

Для случая сильноминерализованной остаточной воды в коллекторе предложена новая термодинамическая модель образования и накопления газовых гидратов в ПЗП. Так, для термобарических пластовых условий месторождений Южной Якутии (давление – 10–15 МПа, температура – 10–20 °С) при высокой минерализации остаточной влаги (вплоть до рассолов, находящихся в равновесии с твердой солью в порах коллектора) устанавливается стационарное распределение ее минерализации в ПЗП: от начального максимального значения (вдали от скважины) до некоторого минимального значения на выходе в ствол скважины. И, что важно, полного опреснения поровой влаги не происходит. При небольших депрессиях газовые гидраты в призабойной зоне не образуются, при этом процесс гидратообразования низкой интенсивности возможен в стволе скважины (причем непосредственно из паров воды в газе, т.е. без выделения капельной влаги). Для более высоких депрессий на пласт гидратообразование в ПЗП становится возможным, при этом устанавливается стационарное распределение минерализации остаточной воды в коллекторе (но полного ее опреснения не происходит). Гидраты в ПЗП образуются только по механизму конденсации паров воды непосредственно в гидратную фазу. Введено новое понятие – «безгидратное время», а понятие «безгидратная депрессия» существенно модифицируется. Последнее понятие расщепляется на два предельных случая: начальный момент ввода скважины в эксплуатацию (когда разбавление остаточной высокоминерализованной влаги еще не успело произойти) и случай длительно работающей скважины (когда установилось стационарное распределение минерализации порового раствора вдоль изоэнтальпы).

Также в общих чертах были освещены направления экспериментальных исследований с целью детализации нестационарного процесса неизотермического течения газа с учетом минерализации остаточной влаги в коллекторе и учета особенностей гидратообразования и гидратонакопления в ПЗП.

## Список литературы

1. Воды нефтяных и газовых месторождений СССР: Справочник / под ред. Л.М. Зорькина. – М.: Недра, 1989. – 382 с.
2. Лапук Б.Б. Теоретические основы разработки месторождений природных газов / Б.Б. Лапук. – М.; Л.: Гостоптехиздат, 1948. – 295 с.
3. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика / И.А. Чарный. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 396 с.
4. Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта / Э.Б. Чекалюк. – М.: Недра, 1965. – 238 с.
5. Бондарев Э.А. Механика образования гидратов в газовых потоках / Э.А. Бондарев, Г.Д. Бабэ, А.Г. Гройсман и др. – Новосибирск: Наука, 1976. – 157 с.
6. Бондарев Э.А. Термогидродинамика систем добычи и транспорта газа / Э.А. Бондарев, В.И. Васильев, А.Ф. Воеводин и др. – Новосибирск: Наука, 1988. – 272 с.
7. Теслюк Е.В. Термогидродинамические основы проектирования разработки нефтяных месторождений при неизотермических условиях фильтрации, обоснование и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий / Е.В. Теслюк, Р.Е. Теслюк. – М.: Грааль, 2002. – 566 с.
8. Ершов С.Е. Влияние микроструктуры и водонасыщенности пористых сред на фильтрационные характеристики / С.Е. Ершов, Д.И. Иванов, М.П. Хайдина. – М.: ИРЦ Газпром, 2007. – 300 с.
9. Тупысев М.К. Исследование фильтрационных задач при образовании гидратов в пористой среде: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.15.06 / М.К. Тупысев. – М., 1976. – 16 с.
10. Лапердин А.Н. Освоение и испытание первой экспериментальной двухзабойной скважины на Южно-Русском месторождении / А.Н. Лапердин, Т.В. Сопнев, Р.Р. Хасаянов и др. // Наука и ТЭК. – 2012. – № 1. – С. 25–26.
11. Истомин В.А. Предупреждение гидратообразования в призабойной зоне пласта при высокой минерализации остаточной воды в коллекторе / В.А. Истомин, Д.М. Федулов, И.И. Минаков и др. // Вести газовой науки: Проблемы эксплуатации газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – № 4 (15). – С 15–21.