

# Диагностика мест образования гидратов в промышленных системах

к.т.н. доц. **Паранук А.А.**  
к.э.н. доц. **Лысенко Ю.А.**,  
к.ф.н. доц. **Гучетль З.Ч.**  
ст. преподаватель **Хрисониди В.А.**,  
ст. преподаватель **Пономарева Г.В.**

филиал ФГБОУ ВО  
«Майкопского государственного технологического университета»  
в пос. Яблоновском, пос. Яблоновский, Россия  
(385140, Россия, Республика Адыгея,  
пос. Яблоновский, ул. Связи, д. 11,  
E-mail: [hristonidi\\_vital@mail.ru](mailto:hristonidi_vital@mail.ru)

**Аннотация.** В данной статье приводится описание процесса образования гидратов в промышленных газопроводах и методы предупреждения гидратов. Дано описание условия образования гидратов для газов различной относительной плотности. Проведен анализ возможных мест образования гидратов в шлейфах газопровода, а также приведены кривые изменение условий образования гидратов

**Ключевые слова:** Гидраты в промышленных системах, капельная влага, точка росы, жидкая фаза

С вводом в разработку газовых, газоконденсатных месторождений Севера будет резко увеличивается число осложнений из-за образования гидратов в стволе скважин. Большинство газовых скважин в акватории океанов характеризуется наличием условий гидратообразования в стволе. Гидраты в скважине могут образоваться как в период ее работы, в кольцевом пространстве в любом интервале глубин, характеризующемся условиями гидратообразования[1].

Гидраты уменьшают пропускную способность аппаратов и газопроводов, а также в ряде случаев приводят к их полной закупорке и прекращению подачи газа. Непременным условием образования кристаллогидратов является наличие в потоке газа жидкой водной фазы. Вода в жидкой фазе может быть в потоке только в том случае, если газ полностью насыщен водяными парами, т.е. если относительная влажность газа равна единице. Под относительной влажностью понимается отношение фактического содержания в газе водяного пара к максимально возможному содержанию его при данных давлении и температуре.

Температура, при которой из газа может выделиться полностью вода при данном содержании воды в газе, называется точкой росы газа по воде при данном давлении. Если в газопровод поступает газ, содержание воды в котором таково, что по условиям транспорта (изменение давления и температуры) температура газа не снижается ниже точки росы, то в таком газопроводе не выпадает капельная влага и, следовательно, отсутствуют условия для образования сплошной гидратов. Если точка росы газа выше температур, до которой может охладиться газ в газопроводе (практически газ может охладиться до температуры грунта, в который уложен газопровод) ,то в таком газопроводе будет происходить конденсация воды, т.е. имеются условия гидратообразования.

Наличие в потоке газа воды в жидкой фазе является необходимым, но еще не достаточным условием образования гидратов. В таком случае гидраты могут образоваться только при

определенных давлениях и температурах в зависимости от состава газа. Зависимость образования гидратов от абсолютного давления и температуры для газов различной относительной плотности (по воздуху) представлена на рис.1. Каждая кривая на графике представляет собой геометрическое место точек начала образования гидратов в зависимости от давления и температуры газов данной относительной плотности. В зоне выше каждой кривой гидраты образуются, ниже кривой отсутствуют. Как видно из графика, возможность образования гидратов (при содержании в газе свободной воды) увеличивается с повышением давления и понижением температуры газа.

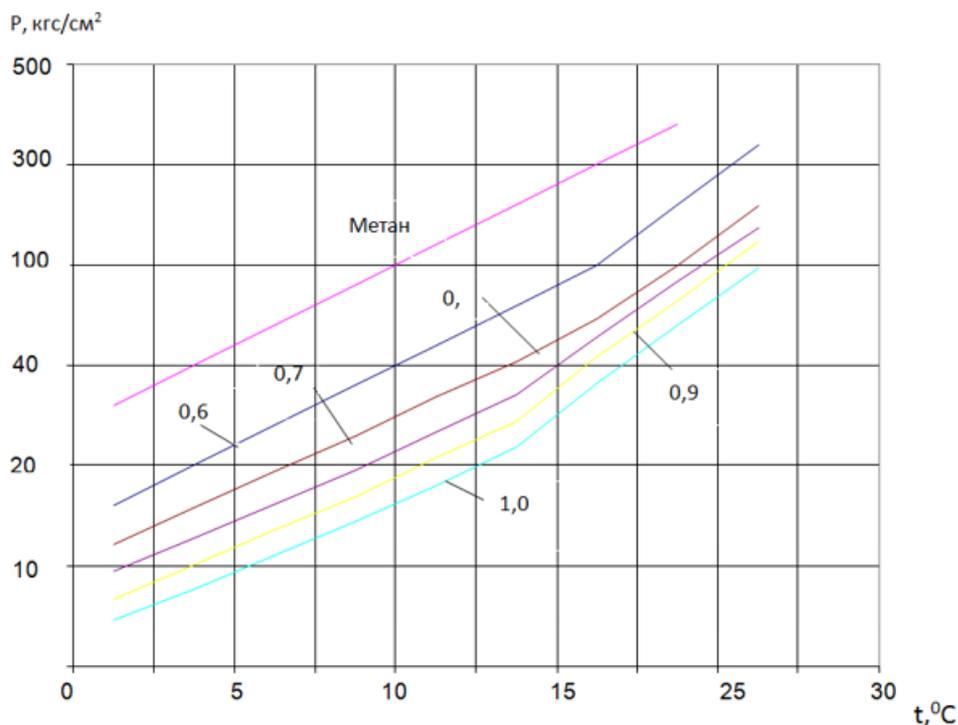


Рисунок 1-Условия образования гидратов для газов различной относительной плотности.

Для выявления условий и зоны возможного образования гидратов в конкретном шлейфе скважины нами разработана компьютерная программа, в соответствии с которой:

1. Строится кривая 1 изменения давления по длине шлейфа, по формуле:

$$p_x = \sqrt{p_1^2 - (p_1^2 - p_2^2) \frac{x}{L}}, \quad (1)$$

где  $p_x$  — давление в любой точке газопровода;  $p_1$  — начальное давление;  $p_2$  — конечное давление;  $x$  — расстояние от начала газопровода до рассматриваемой точки;  $L$  — длина шлейфа в км;

2. Строится кривая 2 изменения температуры газа по длине шлейфа, по известной формуле Шухова.

$$T(x) = T_{\text{грунт}} + (T_{\text{уст}} - T_{\text{грунт}}) \exp(-\phi), \quad (2)$$

$$\phi = \frac{K_T \cdot \pi \cdot d_{\text{вн}} \cdot L}{\rho \cdot Q \cdot C_p}, \quad (3)$$

где  $K_T$  — коэффициент теплоотдачи,  $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}$ ,  $d_{\text{вн}}$  — внутренний диаметр шлейфа, м,  $\rho$  — плотность газа в стандартных условиях,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $Q$  — дебит газа в стандартных условиях,  $\text{м}^3/\text{сут.}$ ,  $C_p$  —

изобарическая теплоемкость газа,  $\text{ккал/кг} \cdot \text{град}$ .

При известных значениях содержания влаги в газе при различных давлениях, пользуясь графиком (рис.1) строится кривая 3 изменения точек росы по длине шлейфа. По известному составу газа строится кривая 4 изменения температуры начала образования гидратов при различных значениях давлений в шлейфе.

В результате работы этой программы мы получаем график (рис.2) изменения условий образования гидратов в шлейфе. На участке ОА капельная влага в шлейфе нет, в связи с тем что точка росы газа ниже его температуры. На участке АБ есть свободная вода, но температура газа выше температуры начала образования гидратов. Следовательно, на участке ОБ гидраты не образуются. Из графика видно, что на участке БВ температура газа ниже температуры начала образования гидратов, поэтому на данном участке шлейфа возможно образование гидратов. От точки В до конца шлейфа точки росы газа ниже его фактической температуры, поэтому здесь вода из жидкой фазы вновь переходит в паровую, и условия для образования гидратов отсутствуют.

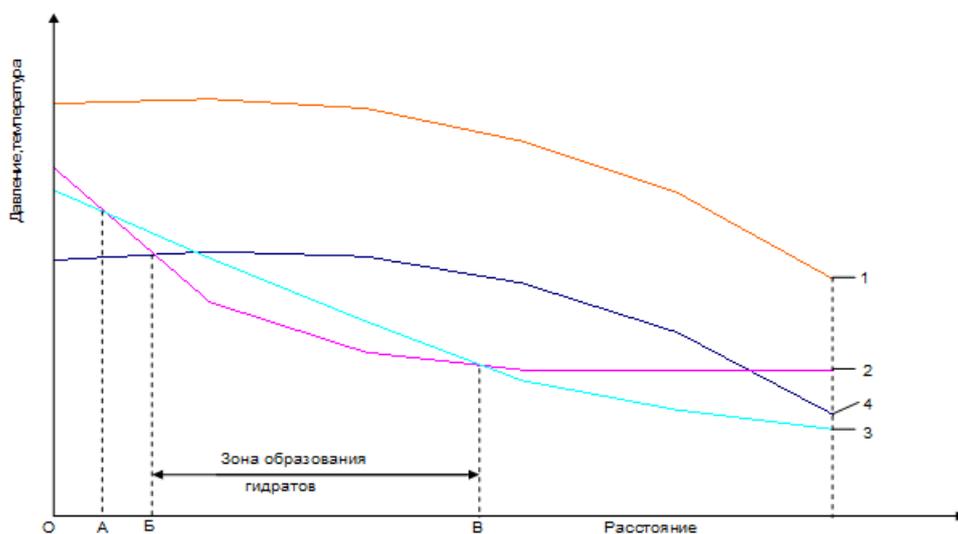


Рисунок 2- Изменение условий образования гидратов в шлейфе скважины, точка 1-изменение давления по длине шлейфа, 2-изменения температуры газа по длине шлейфа; 3-изменение точки росы по длине шлейфа, 4-изменение температуры образования гидратов при различных давлениях.

Наличие участков возможного образования гидратов указывает на необходимость принятия мер по устранению причин и предотвращения гидратообразования.

Методика разрушения гидратов определяется местом их накопления, количеством и характером гидратной пробки, составом гидрата, а также имеющимися средствами ликвидации. Гидраты могут образоваться и полностью или частично перекрыть поток газа в призабойной зоне пласта, в стволе скважины — в колонне фонтанных труб, в кольцевом пространстве, в устьевой арматуре или приустьевом оборудовании, в системе промысловых газопроводов и аппаратов, в магистральных газопроводах, в системах подземного хранения газа, включая пласт и т. д.

При не полной закупорке рабочего сечения, когда возможно еще обеспечить движение газового потока, ликвидация накопившихся гидратов упрощается, так как газовый поток может быть использован для транспорта ингибитора или теплоносителя к поверхности гидрата и для выноса продуктов разложения гидрата. Полное перекрытие рабочего сечения резко осложняет ликвидацию гидратов, так как требуются постоянное удаление жидкой воды и обновление свободной поверхности разложения гидратов, а также соблюдение особой осторожности при использовании тепловых способов ликвидации гидратов.

---

Гидраты в аппаратах и газопроводах могут быть ликвидированы с остановкой их работы или без нее. Обычно остановка оборудования или трубопроводов бывает необходима при наличии сплошной гидратной пробки. При неполной закупорке газопровода или аппарата гидраты следует ликвидировать во время их работы.

Наиболее трудно ликвидировать аварии в системах добычи и транспорта это образование сплошной гидратной пробки, перекрывающей все сечение аппарата или трубопровода. Для предотвращения полной закупорки сечения необходимо постоянный контроль за работой оборудования, особенно в пусковой период на участках с «жестким режимом» работы (пониженные участки газопровода, места дросселирования газа, участки с параметрами газа, близкими к условиям существования гидратов). Основным параметр, характеризующий процесс накопления гидратов на каком-либо участке, — это увеличение перепада давления на этом участке. При увеличении его более чем 2 раза следует выяснить причину нарушения нормального режима. Если она связана с образованием гидратов, то необходимо приступить к мероприятиям по их ликвидации.

При установлении места накопления сплошной гидратной пробки на каком-либо участке необходимо в первую очередь нарушить сплошность гидратов, что достигается подогревом газопровода подачей ингибитора и т. д. Сплошную гидратную пробку необходимо разрушать с ее крыльев. Нельзя подогревать или вводить ингибитор в сплошное тело пробки, так как разложение гидратов может привести к резкому локальному росту давления и разрыву трубопровода. При ликвидации гидратов при температурах, близких к 0 °С, на участке с гидратами следует проводить только после подачи соответствующего количества теплоносителя или, чтобы исключить снижение температуры до 0 °С и исключить замерзание воды, выделяющейся при разложении гидратов. При ликвидации гидратов любым методом, связанным с накоплением воды вместо гидратов (кроме метода сублимации), следует удалить воду и участка газопровода. При этом воду необходимо отбирать из нижней части газопровода на участке с минимальной отметкой. В зимний период работы по ликвидации гидратов должны быть проведены в возможно короткие сроки и приняты меры для исключения замерзания воды и раствора ингибиторов в газопроводе [2].

Формирование газогидратных залежей в зоне гидратообразования в период осадконакопления происходит как со стороны верхней границы зоны за счет поступления новых порций органического вещества в начальный период превращения органического вещества, так и со стороны нижней границы — за счет газов, образующихся в последующие периоды заглубления и дальнейшего превращения органического вещества, а также за счет газов, поступающих из глубинных недр Земли. При вертикальной миграции газы поступают из высокотемпературных зон в зону гидратообразования, увеличивая толщу залежей снизу. Под гидратонасыщенными пластами может накапливаться газ в свободном состоянии, образуя традиционные газовые месторождения. Известны примеры залежей нефти непосредственно под гидратонасыщенными пластами, служащими непроницаемой крышкой для них.

Условия стабильного существования газогидратных залежей в пределах материков и в акваториях принципиально различны. Газогидратные залежи, сформировавшиеся в акваториях, слабо подвержены влиянию изменения температуры на поверхности Земли. Даже при значительном росте приповерхностных температур в придонных водах температура остается практически неизменной. Однако газогидратные залежи в акваториях подвержены влиянию изменения уровня Мирового океана, вызванного формированием крупных объемов льда и его таянием за геологическое время. Во многих районах Мирового океана наличие газогидратных залежей обнаруживает от нескольких десятков или даже сотен метров от дна, что является результатом понижения уровня океана в течение последних оледенений, а также результатом тектонических и стратиграфических перемещений. В период крупных оледенений уровень Мирового

---

океана понижался при практически неизменных придонных температурах. Снижение гидростатического давления приводило к разложению гидрата в придонных осадках. Придонные осадки обычно слабо сцементированы и высокопроницаемы. Газ, высвобождающийся при разложении гидрата, поступает в придонные воды, растворяется и мигрирует в атмосферу, усиливая парниковый эффект. В пределах суши стабильно существуют лишь вторичные газогидратные залежи, образовавшиеся в период последнего оледенения из скоплений свободного газа, сохранившихся под литологическими непроницаемыми покрывками.

Общим результатом динамики изменения условий стабильного существования газогидратных залежей на суше и в акваториях явилось перераспределение запасов газа — в акваториях сосредоточено до 98% и лишь около 2% на материках от общего потенциала.

Исключительно важную роль при формировании залежей газовых гидратов и свободного газа играет растворимость газа в свежее конденсированной воде и в пластовой воде, контактирующей с образующимся гидратом. Кратко рассмотрим особенности процесса формирования газогидратных залежей в этих условиях. Как известно, все природные воды содержат растворенные газы. Именно в системах газ-вода формируются, стабильно существуют и разрушаются залежи природных газов и нефти. Суммарный объем углеводородных газов, растворенных в подземных водах, составляет  $10^{13}$  т.

В недрах Земли растворенный газ выделяется из водного насыщенного раствора в виде микропузырьков. В случае благоприятных термобарических условий скопления микропузырьков, объединяясь, могут формировать крупные залежи свободного газа или залежи газогидрата. При вертикальной или латеральной миграции газонасыщенных водных растворов изменяются давление, температура и степень газонасыщенности раствора, при этом газы могут как растворяться, так и выделяться из раствора. Наличие газогидрата, контактирующего с пластовой водой, резко меняет структуру воды и, как следствие, растворимость газа в воде понижается.

Уже первые исследования растворимости природных газов в воде в условиях образования гидрата показали резкое изменение соотношения количества молекул воды и газа до образования и после образования гидрата. Дальнейшие исследования позволили объяснить условия формирования и разрушения залежей свободного газа и газогидратных залежей в системах газ-вода [8]. Зарождение гидрата всегда происходит на свободной поверхности контакта газ-вода. В недонасыщенном газом растворе процесс образования гидрата не может начаться. Однако в случае образования центров кристаллизации (на поверхности микропузырьков или на поверхности конденсата воды в объеме газа) может развиваться активный процесс роста кристаллов гидрата с формированием крупных скоплений гидрата из растворенного газа в недонасыщенном растворе. В осадочном чехле пород газовые залежи формируются только из свободного газа, выделяющегося из пересыщенного раствора при изменении давления и температуры. Газогидратные залежи могут формироваться и стабильно существовать в условиях дефицита растворенного газа в пластовых водах. Именно это свойство воды (формировать газогидратные залежи в условиях дефицита растворенного газа в воде) обеспечило сохранение на земле огромных ресурсов природных газов в пределах акваторий Мирового океана за геологическое время. Это же свойство определяет интервалы глубин существования газовых и газогидратных залежей в различных термобарических условиях.

### **Список литературы**

1. Макогон Ю. Ф. Газовые гидраты, предупреждение их образование и использования. — М.: Недра, 1985. —232
2. Паранук А.А. Диссертационная работа на соискание кандидата технических наук на тему

---

«Разработка методов раннего обнаружения гидратообразования в магистральных газопроводах и технологических трубопроводах компрессорных станций» спец. 05.02.13 машины, агрегаты и процессы (в нефтегазовой отрасли) 2014 г.

3. Паранук А.А. Разработка программы для расчета гидратообразования в мг на программе борланд дельфи 7.0 // [Экспозиция Нефть Газ](#). 2013. № 5 (30). С. 63-67.
4. Паранук А.А. Программа мониторинга гидратообразования магистральных газопроводов при помощи штатных систем контроля GIDRAT 1.0 // [Наука и техника в газовой промышленности](#). 2015. № 3 (63). С. 55-57.
5. Паранук А.А. [Хранение природного газа в гидратном состоянии в условиях крайнего севера](#) // [Технологии нефти и газа](#). 2015. № 1 (96). С. 62-63.
6. Паранук А.А. Кунина П.С. Определение гидратоопасного интервала скважины и способы предотвращения условий гидратообразования // [Наука и техника в газовой промышленности](#). 2012. № 1 (49). С. 33-42.
7. Макогон Ю. Ф. Особенности эксплуатации месторождений природных газов в зоне вечной мерзлоты. ЦНТИ, 1966.
8. Хайруллин М.Х., Шамиев М.Н., Тулупов Л.А. Моделирование гидратообразования в газопроводах// Нефтегазовое дело 2005. с.