

## МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАБОТЫ ГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

И.О. Кузякин (Строительная компании «Спецстрой»)

*Отмечено, что при транспорте продукции залежей газоконденсатных месторождений от кустов газовых скважин до установок комплексной подготовки газа актуальной является задача снижения степени образования жидкостных и ледяных пробок (гидратов) в системах внутрипромыслового сбора газа. Параметр - расход газа по газопровод-шлейфу не пригоден для диагностирования гидратообразования. Предложен метод диагностирования работы газового оборудования, основанный на анализе расхода газа на входе в здание переключающей арматуры.*

*Ключевые слова: газоконденсатные месторождения, гидратообразование, диагностирование работы газового оборудования, расход газа на входе в здание переключающей арматуры, расход газа по газопровод-шлейфу.*

При разработке концепций построения АСУТП промыслов газоконденсатных месторождений (ГКМ) Крайнего Севера важную роль играют вопросы создания интеллектуальных систем принятия решения и управления (ИУС) ГКМ [1,2]. Руководством ООО «Газпром добыча Ямбург» была поставлена стратегическая цель на период 2021–2023 гг.: повышение качества работ с учетом последних достижений науки и техники в области добычи углеводородного сырья; внедрение и развитие современных информационных технологий, обеспечивающих использование достоверной и оперативной информации; цифровизация технологических процессов, в том числе при принятии управленческих решений.

При транспорте продукции залежей ГКМ от кустов газовых скважин до установок комплексной подготовки газа требуется подобрать решение проблемы снижения степени образования жидкостных и ледяных пробок в системах внутрипромыслового сбора газа, при условии низкой капиталоемкости, минимальных эксплуатационных затратах, простоты реализации и гибкости применения [3].

В основу описанных и существующих методов диагностирования гидратообразования положены измерения ключевых параметров: давления в начале и конце шлейфа, температуры природного газа, дебита скважин и их последующая обработка по какому-либо алгоритму. Иногда производятся достаточно сложные вычисления (используются когнитивные модели или методы нечеткой логики) [4]. Отметим, что в данной области также имеются инновационные решения, которые защищены патентами на изобретения (пат. №№ 2329371, 2344339, 2556482, 2597390, 2604101, 2619602 РФ).

При этом всеми авторами признается факт непригодности использования в анализе параметра расхода газа по газопровод-шлейфу (ГШ), поскольку поток в нем нерегулируемый, а массовый расход - постоянный. Также отмечается, что возможны ложные определения

гидратообразования при изменении технологического режима, регулирования дебита скважин. Но именно такая сложная и неординарная задача представляется интересной к решению.

Образование в ГШ водо- и льдопроявлений (пробок), как правило, дросселируется, создает изменение потока газожидкостной смеси (ГЖС), сопровождающееся пульсациями давления. Параметр «Расход газа на входе в здание переключающей арматуры (ЗПА)» характеризует изменение линейной скорости газа в ГШ в условиях потока (температуры и давления), считаем именно его соответствующим критериям для анализа. В дальнейшем при понижении температуры газа в шлейфе до определенной температуры начинается процесс гидратообразования, отложение гидратов на стенках шлейфа и уменьшение его внутреннего диаметра (облитерация), а вследствие возникновения дроссель-эффекта - дальнейшее падение фактической температуры газа [4,5]

В основу графической интерпретации метода (рис. 1) положены архивные данные портала производственной службы ООО «Газпром добыча Ямбург». В архиве представлены данные о снижении параметра «Расход газа на входе в ЗПА» ГШ до неизмеряемого в период плановой остановки одного из нескольких межпромысловых коллекторов. Снижение этого параметра сопровождалось повышением давления на выходе промысла (неоптимально выбранный режим работы ГШ) и снижением количества подаваемого ингибитора (сезонное уменьшение норм подачи метанола). С целью выявления характерных точек при снижении параметра «Расход газа на входе в ЗПА» ГШ до неизмеряемого предлагается применить к этому параметру статистический метод анализа ПИК-фактора [6], широко распространенный в технической диагностике машин и механизмов, что позволяет получить с достаточной долей вероятности данные о начале негативных процессов в ГШ.

При построении модели за период статистического анализа принят 1 час. За это время определяется ПИК-фактор по параметру расхода ГЖС в среднем по 41-й точке сформированного массива (на рис. 1 приведен период в 1000 отсчетов – 1 сут.). Для этого использованы следующие диагностические параметры: ПИК – максимальное значение сигнала на рассматриваемом интервале времени; СКЗ – среднеквадратичное значение; ПИК-фактор – отношение параметра ПИК к СКЗ.

ПИК-фактор – быстро рассчитываемый и удобный параметр, который позволяет определять изменения линейной скорости газа в ГШ, сопровождающиеся пульсациями давления и снижением температуры. При этом исключается учет «белого шума». Основной целью вычисления ПИК-фактора – дать специалистам первоначальное представление о числе изменений линейной скорости газа в ГШ во временном сигнале и характерных точках (рис. 1).

Опытным путем выяснено, что приближение линий СКЗ и линий отношения ПИК к СКЗ сигнализирует о вероятном начале неоптимального режима работы примерно за 2...10 часов (точка 1, рис. 1), условие (1).

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i)^2} \leq \frac{\sum_{i=1}^n (\min(Y_{i \rightarrow n}) + \max(Y_{i \rightarrow n}))}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i)^2}}, \quad (1)$$

а приближение линий ПИК и линий отношения ПИК к СКЗ характеризуют неблагоприятный режим работы ГШ примерно за 1...1,30 час (т.2, рис. 1), условие (2)

$$\sum_{i=1}^n (\min(Y_{i \rightarrow n}) + \max(Y_{i \rightarrow n})) \geq \sum_{i=1}^n (\min(Y_{i \rightarrow n}) + \max(Y_{i \rightarrow n})) / \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i)^2}, \quad (2)$$

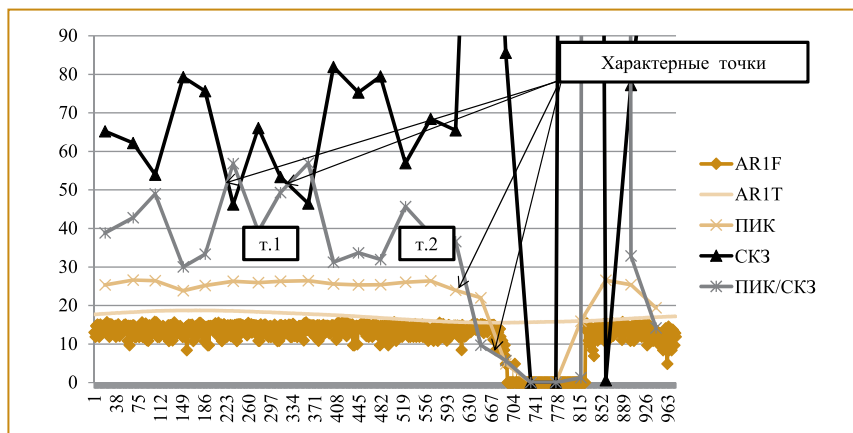


Рис. 1. Графическая интерпретация метода, по оси X - 1000 отсчетов/сут. по оси Y:

AR1F – расход газа на входе в ЗПА, тыс.м<sup>3</sup>/ч;

AR1T – температура газа на входе в ЗПА, °С;

ПИК – максимум/минимум расхода газа на входе в ЗПА за час;

СКЗ – СКЗ расхода газа на входе в ЗПА за час;

ПИК/СКЗ – изменение линейной скорости движения газожидкостной смеси

до снижения минимально-измеряемого расхода ГЖС и полной остановки ГШ, где  $\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i)^2}$  – СКЗ;  $\sum_{i=1}^n (\min(Y_{i \rightarrow n}) + \max(Y_{i \rightarrow n}))$  – максимальное значение сигнала (ПИК) на рассматриваемом интервале времени.

Неравенства (1) и (2) получены из графической интерпретации данных рис.1 ГШ общекolleкторной схемы сбора газа длиной 12,5 км. ГШ характеризуется критической скоростью движения, производительностью 0,45 млн. м<sup>3</sup>/сут. и перепадом давлений между входом в шлейф и входом в установку подготовки газа 0,41 МПа. Работоспособность алгоритма проверена на ГШ коллекторно-лучевой схемы сбора газа длиной 4,8...16,5 км, характеризуемой скоростью движения менее и равной критической, производительностью 0,20...0,57 млн. м<sup>3</sup>/сут. и перепадом давлений между входом в шлейф и входом в установку подготовки газа в диапазоне 0,27...0,63 МПа.

Опыт функционирования газосборной сети (ГСС) Ямбургского НГКМ [7] свидетельствует о снижении производительности в холодные периоды, и о заметном сокращении объема выносимой из ГШ жидкости с последующими залповыми выбросами на вход установки больших объемов при потеплении. Также при эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений и использовании заводской теплоизоляции теплообмен между газожидкостным потоком в трубопроводе и окружающей средой существенно снижается. Теплообмен значительно интенсифицируется при деформации теплоизоляции в местах стыков, а также при монтаже новой теплоизоляции вместо старой. Таким образом, в зимнее время года на внутренней стенке промышленного трубопровода надземной прокладки возможно отложение льда (или гидратов) при низких отрицательных температурах окружающей среды, даже если удельный расход подаваемого ингибитора (метанола) оказывается достаточным (согласно имеющимся методикам его расчета), что также снижает производительность ГСС.

Для образования гидратов необходимо наличие двух условий: присутствие капельной воды и определенный термодинамический режим в ГСС. Условием выпадения влаги в ГШ при определенном давлении является снижение температуры в нем до уровня, при котором газ становится перенасыщенным влагой. При проведении опытов [8] образование и разложение гидратов в термостатирующей рубашке на начальном этапе сопровождается изменением температуры (свидетельством образования и разложения гидратов является пико-образное понижение и повышение температуры) гидратной камеры. Давление в системе остается при этом неизменным. С образованием гидрата давление в системе повышается. После окончания процесса гидратообразования давление в системе снова стабилизируется.

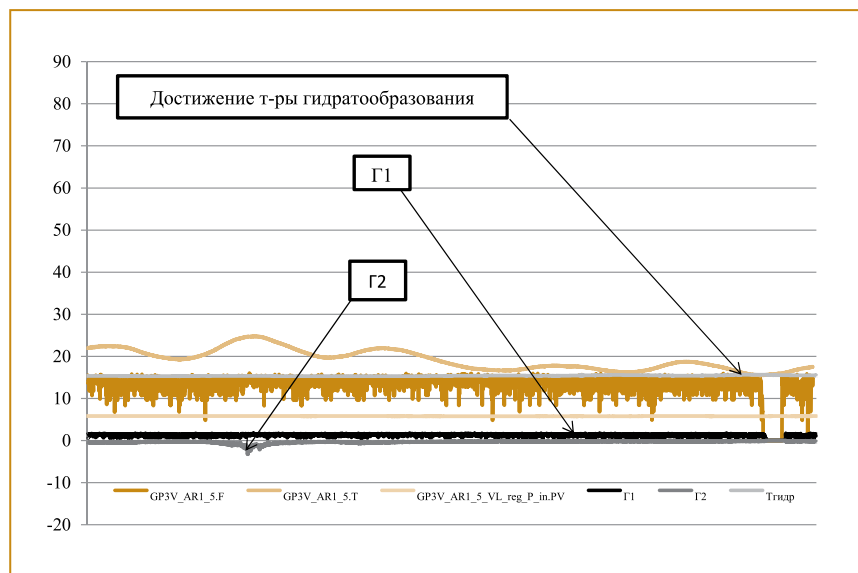


Рис. 2. ГШ КГС 317 в Ямбургского НГКМ, июль 2018 г.  
Расчет Г2 и определение температуры гидратообразования на клапане-регуляторе:

По оси X - 5000 отсчетов/5 сут.

По оси Y:

GP3V\_AR1\_5.F – расход газа на входе в ЗПА, тыс.м<sup>3</sup>/ч

GP3V\_AR1\_5.T – температура газа на входе в ЗПА, °С;

GP3V\_AR1\_5\_VL\_reg\_P\_in.PV – давление на входе в ЗПА, МПа;

Г1 и Г2 – показатели технического состояния газопровод-шлейфа

и клапана-регулятора на ЗПА; Тгидр – температура гидратообразования, °С

Стабилизация продолжается до начала образования льда. Также проведенные опыты показывают, что при наличии условий для образования гидрата замерзание воды раньше образования гидрата исключается. При этом были отмечены явления наличия кусочков льда, намеренно размешанных в ГЖС, в образовавшихся гидратах, которые остаются в массе гидрата до начала его разложения.

Важное значение в подобных условиях имеет фактор определения технического состояния ГСС и мест возникновения образования пробок или наполнения ГШ пластовой водой.

ПАО «ГАЗПРОМ» ведет работы в области разработки Стандартов организации, методик по составлению режима работы установок, включая расчет технологических режимов от пласта до входа в головную компрессорную станцию, с учетом пиковых нагрузок и не запланированных отборов газа. Департаментом 307/5 ПАО «ГАЗПРОМ» утвержден и введен в действие Стандарт организации СТО 2-3.3-945-2015, в п.11.5.2 которого для оценки текущего термодинамического и гидравлического состояния промысловых шлейфов принята формула (3), основанная на оценке соотношении фактической и расчетной пропускной способности ГШ:

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{Q^2}{A}, \quad (3)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – давление в начале и конце ГШ, МПа;  $Q$  – расход газа, м<sup>3</sup>/сут.;  $A$  – фактическая или расчетная пропускная

способность шлейфа, (тыс. м<sup>3</sup>/сут.)<sup>2</sup> / (МПа)<sup>2</sup>.

Расчетное значение пропускной способности ГШ определяют путем решения системы дифференциальных уравнений гидродинамики двухфазных систем, массо- и теплообмена в граничных условиях третьего рода (уравнение движения и баланса тепловой энергии) при заданных характеристиках газа и конструкциях шлейфов, энтальпии с использованием уравнения состояния и на основе решения комбинированного уравнения первого и второго начала термодинамики. Решение подобной системы уравнений в условиях создания ИУС ГKM требует наличия серьезных электронно-вычислительных мощностей.

Движение ГЖС через газовое оборудование круглого сечения (его пропускную способность) можно описать с помощью метода обобщенных формул учета коэффициента гидравлического сопротивления [9]:

$$P_3^2 - P_4^2 = \frac{16\lambda zRTQ^2}{\pi^2}, \quad (4)$$

а для протяженного, горизонтального оборудования уравнением следующего вида:

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{16\lambda zRTlQ^2}{\pi^2 D^5}, \quad (5)$$

где  $P_3$  и  $P_4$  – давление до и после клапана-регулятора (КРД), МПа;  $\lambda$  – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления, (коэффициент Дарси);  $z$  – безразмерный коэффициент сжимаемости;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль · К;  $T$  – температура ГЖС для участка, измеренная в его конце, °С;  $l$  – длина ГШ, м;  $D$  – диаметр газопровода, м.

Как правило, давление в конце ГШ равно давлению на входе в ЗПА. Приняв  $P_2 = P_3$  и решив уравнения (4) и (5) относительно безразмерного коэффициента, получим показатель технического состояния газового оборудования газопровод-шлейфа:

$$\Gamma 1 = \frac{z(273.15+T)Q^2}{(P_1^2 - P_2^2)a} \quad (6)$$

$$a = \frac{16\lambda Rl}{\pi^2 D^5}$$

и клапана-регулятора на входе в здание переключающей арматуры (ЗПА):

$$\Gamma 2 = \frac{z(273.15+T)Q^2}{(P_3^2 - P_4^2)S}, \quad (7)$$

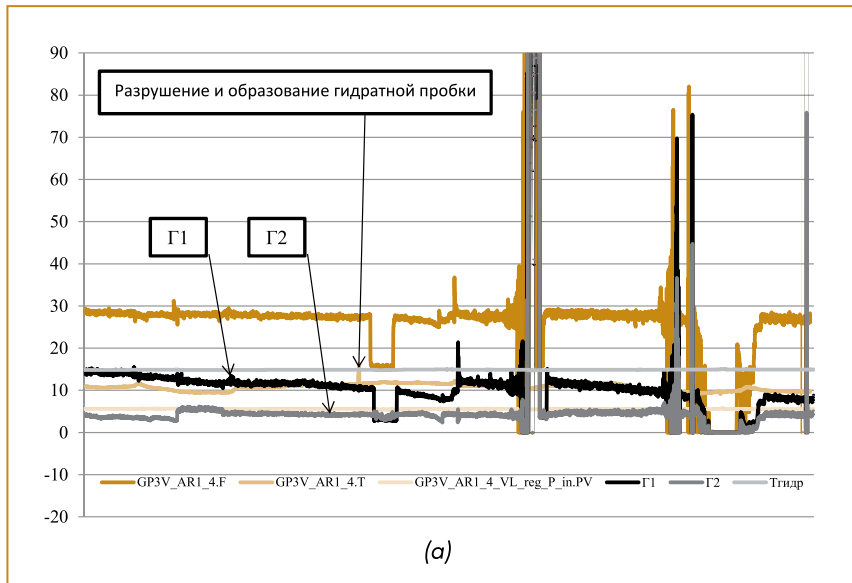


Рис. 3. ГШ КГС 326в Ямбургского НКМ, февраль 2019 г.  
(а) Расчет Г1 и определение температуры гидратообразования в газопровод-шлейфе

По оси X - 5000 отсчетов/5 сут.

По оси Y:

GP3V\_AR1\_2.F – расход газа на входе в ЗПА, тыс.м<sup>3</sup>/ч;

GP3V\_AR1\_2.T – температура газа на входе в ЗПА, °С;

GP3V\_AR1\_2\_VL\_reg\_P\_in.PV (МПа) - давление на входе в ЗПА, МПа;

$x_0/100$  – значение в реальном времени, м;

$x_0/100$  - среднее значение за сут., м (величина  $x_0$  делится на 100 для возможности представить кривые на одном графике)

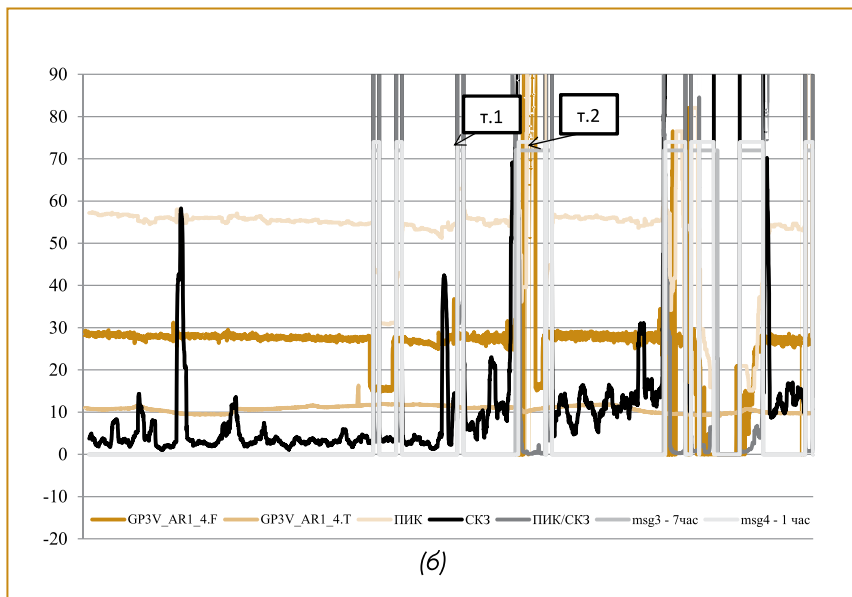


Рис. 3. ГШ КГС 326в Ямбургского НКМ, февраль 2019 г.

(б) Расчет ПИК-фактора:

По оси X - 5000 отсчетов/5 сут.

По оси Y:

GP3V\_AR1\_4.F – расход газа на входе в ЗПА, тыс.м<sup>3</sup>/ч;

GP3V\_AR1\_4.T – температура газа на входе в ЗПА, °С;

ПИК – максимум/минимум расхода газа на входе в ЗПА за час;

СКЗ - СКЗ расхода газа на входе в ЗПА за час;

ПИК/СКЗ – изменение линейной скорости движения газожидкостной смеси;

msg3 = 7 час – сигнализатор т.1; msg4 = 1 час - сигнализатор т.2

где Г1 – показатель технического состояния ГШ, Г2 – показатель технического состояния КРД на ЗПА, S – внутренний диаметр дросселирующего устройства (седла КРД либо замерного устройства), мм.

Выполненные проверочные расчеты показателей технического состояния по формулам (6) и (7) показали свою универсальность в широком диапазоне чисел Рейнольдса, учитывают охлаждение газа в следствие его дросселирования, теплообмен с окружающей средой и эффект Джоуля-Томпсона. Показали применимость для возможности оценки функционирования ГСС Валанжинской залежи Ямбургского НКМ.

Рассмотрим графический результат расчета показателей технического состояния по формулам (6) и (7). Для расчетов приняты архивные данные портала производственной службы ООО «Газпром добыча Ямбург». Расчеты показателей технического состояния КРД Г2 (рис. 2) демонстрируют возможность обнаружения гидратообразования на КРД даже в летний период времени и коррелируют с результатами метода [10]. Расчеты показателей технического состояния ГШ Г1 (рис. 3а) подтверждают свою универсальность для оценки функционирования ГСС, коррелируют с результатами метода [10] (рис. 3б).

Информативность определения показателей технического состояния оборудования незначительно снижается при использовании вместо измеряемых в реальном времени параметров периодических замеров либо показателей из режимных листов.

Показатель технического состояния газового оборудования является безразмерной величиной, характеризующей пропускную способность (6) клапана-регулятора давления на входе ЗПА, регулируемого оборудования КРД и пропускную способность (7) ГШ.

Расчеты показывают возможность определения косвенной оценки состояния оборудования в широких диапазонах: чем условный показатель Г больше, тем пропускная способность газового оборудования выше. Оценивая показатели, можно получать диагностическую информацию в реальном времени для любого газового оборудования

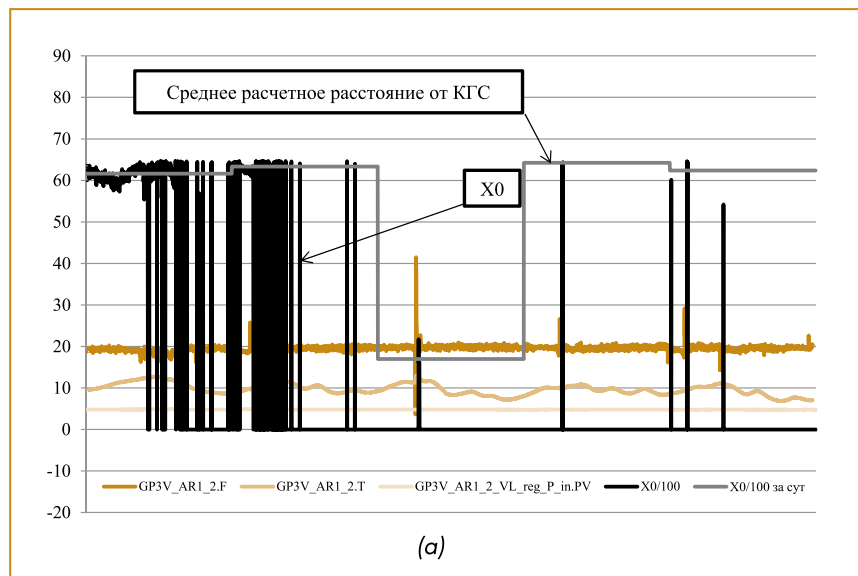


Рис. 4 ГШ КГС 312в Ямбургского НГКМ, март 2021 г.

(а) Расчет  $x_0$ , как следствие определения облитерации газопровод-шлейфа  
По оси X - 5000 отсчетов/5 сут.

По оси Y:

GP3V\_AR1\_2.F - расход газа на входе в ЗПА, тыс.м<sup>3</sup>/ч;

GP3V\_AR1\_2.T - температура газа на входе в ЗПА, °С;

GP3V\_AR1\_2\_VL\_reg\_P\_in.PV - давление на входе в ЗПА, МПа;

$x_0/100$  - значение в реальном времени, м;

$x_0/100$  - среднее значение за сут., м

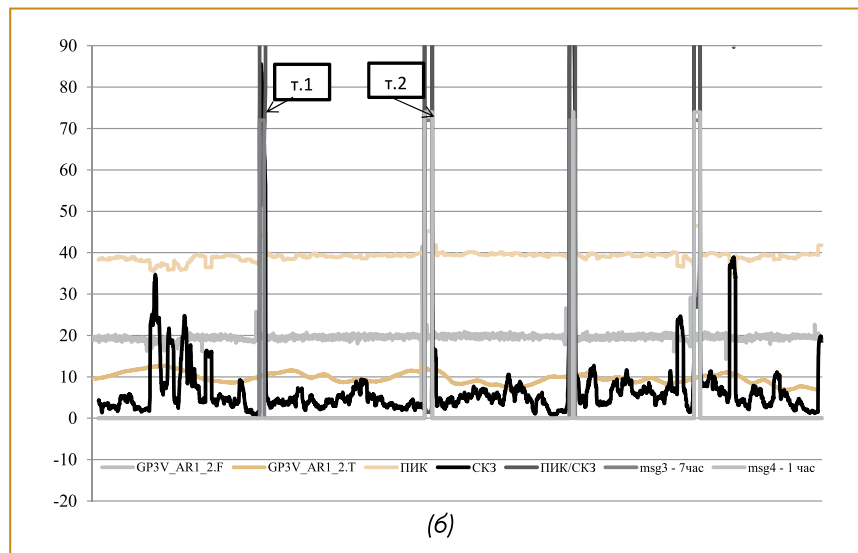


Рис. 4 ГШ КГС 312в Ямбургского НГКМ, март 2021 г.

(б) Расчет ПИК-фактора:

По оси X - 5000 отсчетов/5 сут.

По оси Y:

GP3V\_AR1\_2.F - расход газа на входе в ЗПА, тыс.м<sup>3</sup>/ч;

GP3V\_AR1\_2.T - температура газа на входе в ЗПА, °С;

ПИК - максимум/минимум расхода газа на входе в ЗПА за час;

СКЗ - СКЗ расхода газа на входе в ЗПА за час;

ПИК/СКЗ - изменение линейной скорости движения газожидкостной смеси;

msg3 = 7 час - сигнализатор т.1; msg4 = 1 час - сигнализатор т.2 (рис. 1)

газосборной сети и подобрать наиболее оптимальный режим его работы.

Для определения мест образования пробок в протяженном, горизонтальном оборудовании применение известной

формулы Шухова признается авторами [1, 2] перспективной при разработке ИУС ГКМ:

$$t = t_0 + (t_n - t_0)e^{-ax} \quad (8)$$

$$a = \frac{K\pi D}{\rho C_p Q}$$

где  $t$  и  $t_0$  – температура газа в газопроводе и окружающей среде, °С;  $t_n$  – температура газа на входе в газопровод-шлейф (ГШ), °С;  $x$  – расстояние от начала ГШ до рассматриваемой точки, м;  $K$  – коэффициент теплопередачи в окружающую среду, кДж/м<sup>2</sup>·ч·°С;  $D$  – диаметр газопровода, м;  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – теплоемкость газа, кДж/кг·°С;  $Q$  – расход газа, м<sup>3</sup>/сут.

При наземной прокладке ГШ на территории Ямбургского НГКМ в исследованиях [1] отмечается, что расчет температуры необходимо вести с учетом охлаждения газа из-за его дросселирования. Тогда уравнение (8) примет вид:

$$t = t_0 + (t_n - t_0)e^{-ax} - \frac{A}{C_p} \frac{\Delta z}{l} \frac{1 - e^{-ax}}{a}, \quad (9)$$

где  $A$  – тепловой эффект работы, кДж/кг·м;  $\Delta z$  – разница отметок между конечной и начальной точками ГШ, м;  $l$  – длина ГШ, м.

Для аналитического определения температуры, когда изменение давления в ГШ значительно, предлагается использовать формулу Шухова, модифицированную С.А. Бобровским и В.И. Черникиным – данное уравнение учитывает теплообмен с окружающей средой и эффект Джоуля-Томпсона:

$$t = t_0 + (t_n - t_0)e^{-ax} -$$

$$\mu \frac{P_1 - P_2}{l} \frac{1 - e^{-ax}}{a} - \frac{A}{C_p} \frac{\Delta z}{l} \frac{1 - e^{-ax}}{a}, \quad (10)$$

где  $\mu$  – коэффициент Джоуля-Томпсона, °С/МПа;  $P_1$  и  $P_2$  – давление в начале и конце ГШ, МПа.

При движении газожидкостной смеси (ГЖС) происходит выравнивание значений температуры смеси и окружающей среды в следствии их теплообмена. Расстояние до точки выравнивания значений температуры можно найти из уравнения (10), приняв  $t = t_0$  и  $x = x_0$  и решив его относительно  $x_0$ :

$$x_0 = -\frac{1}{a} \ln \left( \frac{a(t_n - t_0)}{\mu \frac{P_1 - P_2}{l} + \frac{A}{C_p} \frac{\Delta z}{l}} + 1 \right), \quad (11)$$

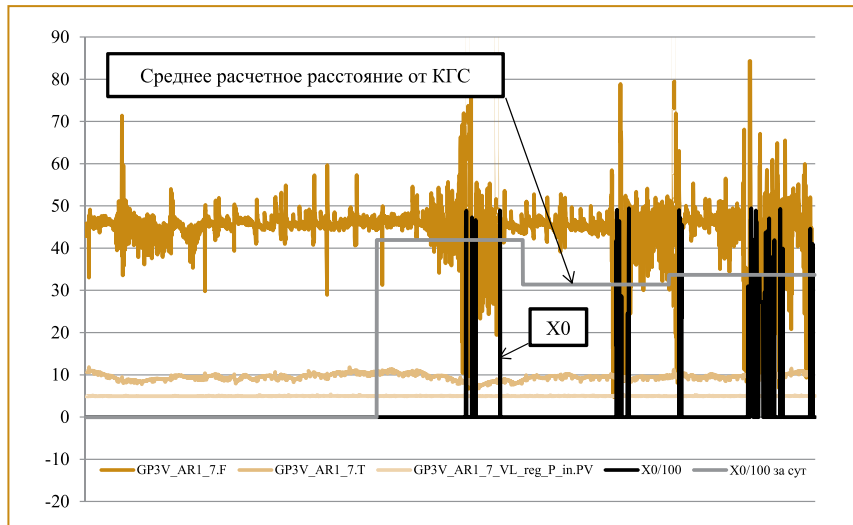


Рис. 5. ГШ КГС 310 в Ямбургского НКМ, февраль 2021 г.  
 Расчет  $x_0$ , после ревизии газопровод-шлейфа выявлен посторонний предмет  
 По оси X - 5000 отсчетов/5 сут.  
 По оси Y:  
 GP3V\_AR1\_7.F - расход газа на входе в ЗПА, тыс.м<sup>3</sup>/ч;  
 GP3V\_AR1\_7.T - температура газа на входе в ЗПА, °С;  
 GP3V\_AR1\_7\_VL\_reg\_P\_in.PV - давление на входе в ЗПА, МПа;  
 $x_0/100$  – значение в реальном времени, м;  
 $x_0/100$  – среднее значение за сут., м

На рис. 4 и 5 представлены графические результаты расчета точек выравнивания значений температуры по (11) в ГШ, для расчетов приняты архивные данные портала производственной службы ООО «Газпром добыча Ямбург». Расчеты точек выравнивания температуры показывают характерное место образования пробок в ГШ при изменении профиля трассы, как правило, на переходах с инженерными сооружениями (рис. 4а, 5а), коррелирующие с результатами метода [10] (рис. 4б).

Не смотря на полученные экспериментальные данные, подтвержденные расчетом, эксперты ООО «Газпром добыча Ямбург» скептически относятся к применимости формул (6), (7), (11) для разработки автоматизированной системы оперативной диагностики (АСОД) в составе ИУС ГКМ.

Тем не менее, получаемая диагностическая информация в рамках создания АСОД весьма полезна для принятия решений персоналом, работающим на установке. Эта информация позволяет определять техническое состояние оборудования ГСС (запорной арматуры на входе в ЗПА, ГШ), места образования пробок в ГШ и режим работы скважин (ноу-хау ООО «Газпром добыча Ямбург»). Интеграция АСОД с автоматизированной системой прогнозирования расхода ингибитора (АСПРИ) позволит обоснованно расходовать ингибитор (метанол) и увеличить производительность ГСС.

Метод применим на установках, оснащенных замерными устройствами на входе здания переключающей арматуры (ЗПА) и необорудованных по ряду различных причин комплексами телеметрии. Метод отвечает требованиям: минимальных материальных затрат при использовании,

простоты реализации и гибкости применения [3].

Специалистами *строительной компании «Спецстрой»* в настоящее время реализован алгоритм, производящий необходимые расчеты в реальном времени, и проводятся работы по доработке программного обеспечения с целью набора статистики по снижению негативных последствий в ходе контролируемого технологического процесса.

Приглашаем коллег к сотрудничеству и обсуждению данного вопроса.

#### Список литературы

1. Ананенков А.Г., Ставкин Г.П., Талыбов Э.Г. АСУТП промыслов газоконденсатного месторождения Крайнего Севера. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». 1999. – 230 с.
2. Алиев Р.А. и др. ИУС газопромысловых объектов: современное состояние и перспектива развития. М.: ООО «Издательский дом Недра». 2014. – 462 с.
3. Кудияров Г.С. Обеспечение стабильной эксплуатации газосборных сетей на поздней стадии разработки сеноманской залежи Ямбургского месторождения // II Арктическая совместная научно-практич. конф. ООО «Газпром добыча Уренгой» и ООО «Газпром добыча Ямбург»: сб. тр. Ямбург, 2018. – С. 48-49
4. Прахова М.Ю., Краснов А.Н., Хорощавина Е.А. Анализ методов диагностирования гидратообразования в шлейфах // Нефтегазовое дело. 2017. – С. 77-94
5. Волков М.М. и др. Справочник работника газовой промышленности. Рец. А.Д. Седых. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 234 с.
6. Пархоменко П.П. О технической диагностике. – М.: Знание. 1969. – 64 с.
7. Сергеева Д.В., Кудияров Г.С. Отложение газовых гидратов или льда в промысловых трубопроводах систем сбора газа Сеноманской залежи Ямбургского месторождения // Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ. 2018. С. 33-42
8. Макогон Ю. Ф. Условия образования и разложения гидратов в области отрицательных температур // Газовое дело. Новости нефтяной и газовой техники. 1961. №12.
9. Черников А.В. Обобщение расчета коэффициента гидравлического сопротивления трубопроводов // Наука и технология углеводородов. 1998. №1. С. 21-23
10. Кузякин И.О. Метод диагностирования работы газосборной сети в не оптимальном режиме // Тр. национальной научно-практич. конф. «Нефть и газ: технологии и инновации». Т. 1. Тюмень: ТИУ, 2019. С. 193-196.

Кузякин Игорь Олегович – директор строительной компании «Спецстрой».  
 E-mail: io.kuziakin@aspestroy.ru