

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ НА УСТЬЕ СКВАЖИН

*Г.А. Ланчаков (ООО «Газпром добыча Уренгой»), О.В. Ермолкин,
М.А. Гавшин (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина),
Б.А. Григорьев (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)*

Важнейшим носителем информации о состоянии и работе продуктивного пласта является поступающая из скважины продукция, поэтому вопросам контроля ее параметров уделяется большое внимание. Особое место отводится оперативному контролю расходных параметров, включая отдельный учет дебита газа, дебита жидкости, выноса воды и твердых примесей (песка). Именно информация о производительности скважин и выносе примесей в виде воды и песка и динамике их изменения в процессе эксплуатации позволяет судить о работе пласта и состоянии призабойной зоны. Поэтому опыт оперативного контроля параметров многофазных потоков продукции скважин Уренгойского ГНКМ с помощью информационно-измерительных систем серии «Поток» представляется заслуживающим внимания и изучения.

Системы серии «Поток» созданы в результате многолетнего тесного научно-технического сотрудничества ученых РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина и специалистов ООО «Газпром добыча Уренгой». Эти системы позволяют измерить дебит газа, дебит жидкости (для газоконденсатных и нефтяных скважин) без сепарации потока продукции скважин, а также дать количественную оценку выноса воды и песка.

В основу работы систем серии «Поток» положен запатентованный бессепарационный спектрометрический метод измерения расхода многофазных потоков [1], который в самом общем виде можно описать следующим образом. На трубопроводе после специального сужающего устройства (формирователя потока) устанавливается датчик, тело которого погружено в поток (рис. 1). Выступающая часть датчика выполнена в виде полого металлического цилиндра. Внутри закреплен цилиндрический пьезокерамический преобразователь. Датчик нечувствителен к избыточному давлению в трубопроводе и реагирует только на флуктуационную составляющую. Выходной электрический сигнал датчика линейно связан с флуктуационной составляющей давления (флуктуационным процессом). Расположенный перед датчиком формирователь потока предназначен для обеспечения следующих условий:

- формирования потока определенной структуры в широком диапазоне изменения расхода фаз;
- генерации флуктуационного процесса, отличающегося спектром с заданными информационными свойствами.

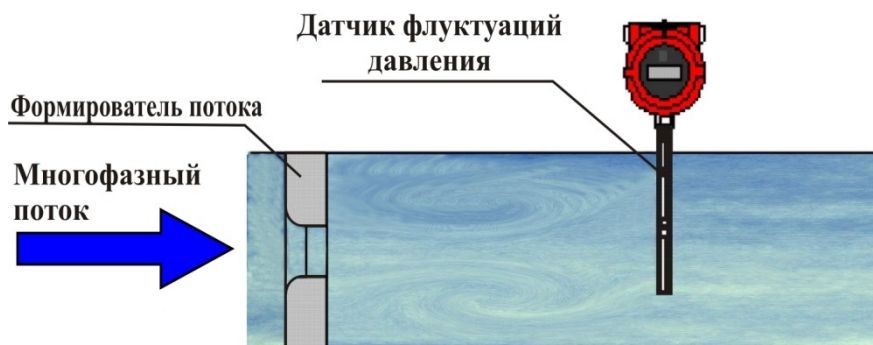


Рис. 1. Измерительный преобразователь расхода

При использовании такого формирователя потока в спектре выходного сигнала датчика можно выделить частотные области, в которых влияние фаз различно (рис. 2): например, частотную область, в которой мощность спектральных составляющих в основном зависит от расхода жидкости (Ж) в смеси и в меньшей степени от расхода газа, или область наибольшего влияния газа (Г). По мощности спектральных составляющих в таких частотных областях на основе информационных моделей можно вычислить соответствующие расходы фаз.

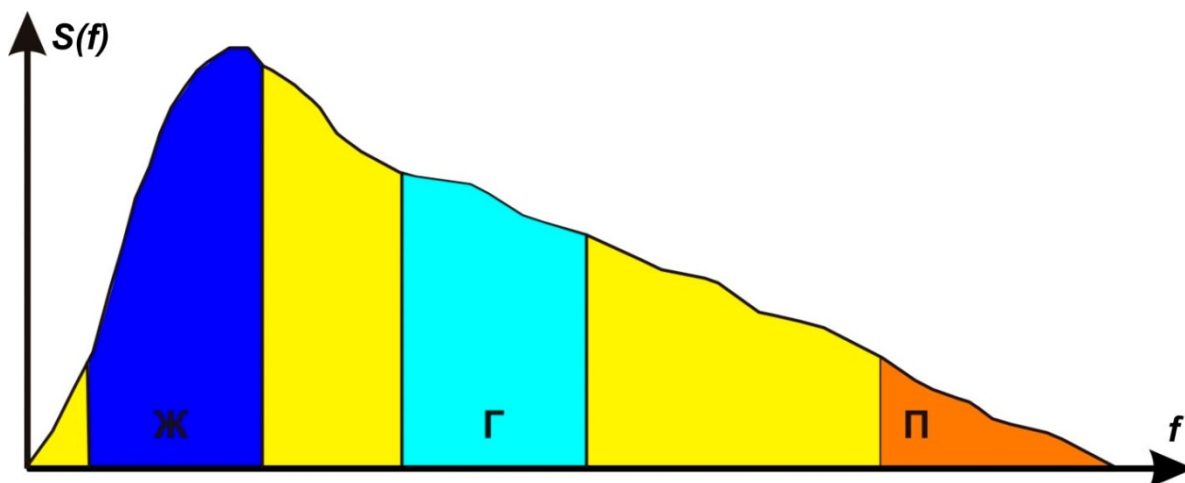


Рис. 2. Характерный частотный спектр выходного сигнала флуктуационного датчика: Ж, Г, П – частотные области; $S(f)$ – спектральная плотность мощности сигнала; f – частота сигнала

Отмеченные характерные зависимости изменения мощности спектральных составляющих потока от расхода фаз становятся понятными, если принять во внимание физическую природу возникновения флуктуаций давления при движении скоростных потоков по трубопроводу с сужающим устройством. В работе [2] показано, что при больших скоростях потока колебания количества смеси в сужении имеют резко выраженную прямоугольную форму. Объясняется это явление следующим образом. Перед сужениями образуются значительные по размерам вихревые зоны. В силу большой инертности жидкости и преимущественным движением ее вдоль стенок канала в этих зонах концентрируются значительные массы жидкости. Под воздействием газового потока происходят периодические выбросы порций жидкости в его основное ядро, способные даже кратковременно перекрывать узкое сечение сужения. Это приводит к импульсному характеру движения порций газа и газожидкостной смеси через сужение и к появлению мощных флуктуаций перепада давления.

Такое представление о физике процесса хорошо согласуется с наблюдаемым характерным изменением мощности спектральных составляющих. Действительно, периоду следования газового потока через сужение должен соответствовать широкий спектр турбулентности (в силу турбулизации на сужении на стенках датчика, выступающего в поток). При этом мощность спектра во всей полосе будет зависеть от расхода газа, т.к. интенсивность турбулентности связана со скоростью потока [3].

В моменты инъекций порций жидкости в системе появляется дополнительный импульсный сигнал перепада давления на сужении. Поскольку спектр импульсного сигнала имеет характерный максимум в низкочастотной области, то можно полагать, что суммарный спектр сигнала флуктуаций давления в большей степени изменится (возрастет) в низкочастотной области. Очевидно, что большие порции жидкости будут приводить к большему увеличению мощности спектра в низкочастотной области.

Естественно предположить, что по интенсивности спектральных составляющих в низкочастотной области можно судить о расходе жидкости в смеси, а по интенсивности сигнала в более высокочастотной области – о расходе газа (см. рис. 2). Такое характерное изменение спектра будет соответствовать потокам газожидкостных смесей со свободной жидкостью (например, потоки нефтяных и газоконденсатных скважин). При малых содержаниях жидкости, когда она находится

в газовом потоке в мелкодисперсном (аэрозольном) состоянии (например, потоки газовых скважин), физические закономерности движения смеси через сужение изменяются. В этих условиях в диапазоне звуковых частот, соответствующих спектру турбулентности, не удастся выделить зоны различного влияния жидкости и газа. Однако такое разделение возможно в ультразвуковом диапазоне частот. Как показали исследования, в ультразвуковом диапазоне турбулентность газового потока не проявляется. Вместе с тем влияние мелкодисперсных капель жидкости очень значимо. Объясняется это следующими причинами. Мелкодисперсные капли жидкости, разгоняясь в сужении, воздействуют на датчик, выступающий в поток. Результат такого воздействия – короткие ударные импульсы, имеющие широкополосный спектр. Ввиду малой интенсивности такого воздействия по сравнению с интенсивностью турбулентности, в низкочастотной области спектра это не сказывается. Наоборот, в высокочастотном ультразвуковом диапазоне, где турбулентность не проявляется, сигналы ударного воздействия мелких капель жидкости могут быть эффективно выделены.

Аналогичным образом проявляется ударное воздействие песчинок. В этом случае с учетом остроты кромок частиц песка следует ожидать более коротких ударных импульсов и с большей амплитудой, чем при воздействии мелкодисперсных капель жидкости. Спектр таких импульсов будет еще более широкополосным, поэтому воздействие частиц песка может быть выделено на фоне других ударных воздействий в более высокочастотном ультразвуковом диапазоне.

Таким образом, учитывая отмеченные физические закономерности движения многофазных смесей, можно говорить о перспективности идеи спектрометрического анализа флуктуационного процесса при решении задач измерения и контроля расходных параметров потока продукции эксплуатационных скважин.

Обобщенная информационная модель флуктуационного процесса в газожидкостном потоке

Рассмотрим модель взаимодействия датчика с набегающим потоком при стационарных внешних условиях. При таком взаимодействии на поверхности пьезокерамического преобразователя индуцируется заряд, обусловленный пьезоэлектрическим эффектом.

Как известно, при пьезоэлектрическом эффекте поверхностная плотность заряда σ пропорциональна приложенному давлению P :

$$\sigma = K \cdot P,$$

где K – постоянный коэффициент.

Если S – поверхность чувствительного элемента датчика, то общий заряд q , индуцируемый на его поверхности, можно представить в виде

$$q = \iint_S K \cdot P_0 \cdot dS = K \cdot \bar{S} \cdot P,$$

где \bar{S} – усредненная поверхность пьезоэлемента.

Ток i в цепи и выходное напряжение u определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} i &= \frac{dq}{dt} = K \cdot \bar{S} \cdot \frac{\partial P}{\partial t}, \\ u &= i \cdot Z_R = K \cdot Z_R \cdot \bar{S} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = K_1 \cdot \frac{\partial P}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где Z_R – выходное сопротивление датчика; K_1 – постоянный (для данного датчика) размерный коэффициент.

Давление P при турбулентном характере течения и при стационарных внешних условиях можно представить в виде двух слагаемых

$$P = \bar{P} + \tilde{p}, \quad (2)$$

где \bar{P} – среднее значение давления, не зависящее от времени; \tilde{p} – пульсационная составляющая, причем среднее значение \tilde{p} равно нулю.

С учетом (1) и (2) получим

$$u(t) = K \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = K \cdot \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t}, \quad (3)$$

где $u(t)$ – выходное напряжение пьезокерамического датчика; K – постоянный коэффициент.

Следовательно, пьезоэлектрический датчик реагирует на скорость изменения пульсационного давления.

В общем виде связь между выходным напряжением датчика и гидродинамическими параметрами потока можно получить на основании следующих соображений. Рассмотрим ряд параметров, безусловно сказывающихся на гидродинамическом режиме потока:

Q – объемный расход газожидкостной смеси; ρ – плотность газожидкостной смеси; μ_2 , $\mu_{ж}$ – динамические коэффициенты вязкости,

характеризующие молекулярное трение (вязкость) в элементах газовой и жидкой фаз; σ – коэффициент поверхностного натяжения, отражающий работу, затрачиваемую на изменение поверхности раздела фаз; g – ускорение свободного падения; l – линейный размер системы ($l = d$, где d – диаметр канала, по которому движется поток); β – коэффициент расходного газосодержания

$$\beta = \frac{Q_g}{Q} = \frac{Q_g}{Q_g + Q_{ж}}$$

где Q_g , $Q_{ж}$ – расход газовой и жидкой фаз.

Через параметр β плотности газовой ρ_g и жидкой $\rho_{ж}$ фаз связаны соотношением

$$\rho = \beta\rho_g + (1 - \beta)\rho_{ж}$$

Исследуем зависимость среднего квадратического значения U выходного сигнала от основных гидродинамических параметров:

$$U = \varphi_1(Q, \rho, \mu_g, \mu_{ж}, \sigma, g, d, \beta), \quad (4)$$

где φ_1 – некоторая функция, вид которой устанавливается.

Оценим наиболее значимые переменные зависимости (4). С этой целью составим и проанализируем следующие безразмерные комплексы:

$$K_1 = \frac{4Q}{\pi d} \left(\frac{\beta\rho_{ж}}{\mu_{ж}} + \frac{(1-\beta)\rho_g}{\mu_g} \right) = Re;$$

$$K_2 = \frac{\sigma}{g(\rho_{ж} - \rho_g)l^2};$$

$$K_3 = gl^5/Q^2.$$

Комплекс K_1 представляет собой число Рейнольдса Re для смеси. Комплекс K_2 характеризует соотношение силы поверхностного натяжения и выталкивающей силы, а комплекс K_3 – соотношение силы тяжести и инерционных сил.

Для типовых режимов работы нефтяных, газовых и газоконденсатных скважин при движении потока через внезапное сужение диаметром 10...60 мм числовые значения безразмерных комплексов составят $Re = 10^4 \dots 10^7$; $K_2 = 10^{-4} \dots 10^{-2}$; $K_3 = 10^{-6} \dots 10^{-2}$.

Значения чисел Рейнольдса заметно превышают критический уровень $Re_{кр} = 2 \cdot 10^3 \dots 4 \cdot 10^3$. Следовательно, поток носит турбулентный характер. При этом главную роль в потоке играют крупномас-

штабные флуктуации давления, масштаб l которых достигает порядка характеристического размера системы (в данном случае $l = d$). Для крупномасштабного движения – основного в каждом турбулентном потоке – вязкость жидкостей несущественна. Поэтому влияние параметров μ_2 и $\mu_{жс}$ в зависимости (4) малозначимо.

Числовые значения комплекса K_2 на два–четыре порядка меньше единицы, следовательно, влиянием поверхностного натяжения по сравнению с выталкивающей силой можно пренебречь. Это означает, что для зависимости (2–4) влияние σ в сравнении с влиянием g также малозначимо.

Числовые значения комплекса K_3 на несколько порядков меньше единицы. Поэтому влияние сил тяжести по сравнению с инерционными силами можно не учитывать. Следовательно, для зависимости (4) влияние параметра g значительно менее значимо, чем влияние параметра Q .

Исходя из сделанных оценок, зависимость (4) можно упростить

$$U = \varphi_2(Q, \rho, d, \beta). \quad (5)$$

Чтобы установить вид зависимости (5), воспользуемся приемами теории размерностей. Будем считать, что независимая переменная β – безразмерный параметр, а число размерных независимых переменных Q , ρ и d равно числу фундаментальных размерностей (имеются в виду длина L , масса M , время T), поэтому на основании π теоремы анализа размерностей зависимость (5) можно преобразовать в выражение

$$U = \Phi(Q, \rho, d)\varphi(\beta),$$

где $\varphi(\beta)$ – некоторая безразмерная функция от β ; $\Phi(Q, \rho, d)$ – размерный комплекс, составленный из размерных независимых переменных.

Общий вид размерного комплекса:

$$\Phi(Q, \rho, d) = \rho^e Q^m d^n,$$

где e , m , n – константы.

Константы e , m и n определяются на основании следующих соображений. Комплекс Φ с учетом соотношения (3) должен иметь размерность параметра $\partial p / \partial t$. Поэтому, выразив размерности параметров Q , ρ , d и $\partial p / \partial t$ через фундаментальные размерности, можно составить равенство

$$\left[\frac{M}{LT^3} \right] = \left[\frac{M}{L^3} \right]^e \cdot \left[\frac{L^3}{T} \right]^m \cdot [L]^n.$$

Приравняв показатели при параметрах L , M и T в левой и правой частях равенства, найдем $e = 1$, $m = 3$, $n = -7$.

Следовательно, уравнение связи выходного сигнала датчика с основными гидродинамическими параметрами будет таким:

$$U = A \frac{\rho Q^3}{d^7} \varphi(\beta) \quad (6)$$

(здесь A – постоянный коэффициент).

Из выражения (6) получим обобщенную информационную модель расхода газожидкостной смеси при фиксированном сужающем устройстве

$$Q = K^* \left(\frac{U}{\rho} \right)^{1/3} \psi_1^*(\beta), \quad (7)$$

где K^* – постоянный коэффициент; $\psi_1^*(\beta) = [\varphi(\beta)]^{-1/3}$.

Далее выполним ряд преобразований, воспользовавшись очевидным соотношением, справедливым при неизменных значениях плотностей жидкости и газа в нормальных условиях:

$$\left(\frac{1}{\rho} \right)^{1/3} = \psi_2^*(p, \beta),$$

где p – абсолютное давление в линии; ψ_2^* – известная функция.

В ограниченных диапазонах изменения параметров p и β будем считать допустимым переход к функциям с разделенными переменными:

$$\psi_1^*(\beta) \psi_2^*(p, \beta) = \psi_1(\beta) \psi_2(p),$$

где $\psi_1(\beta)$ и $\psi_2(p)$ – новые функции одной переменной.

Тогда модель расхода (7) сводится к следующему виду:

$$Q = B \cdot U^{1/3} \cdot \psi_1(\beta) \cdot \psi_2(p), \quad (8)$$

где B – постоянный коэффициент.

Информационные модели расхода жидкости и газа в многофазном потоке

Чтобы перейти к информационным моделям расхода фаз, воспользуемся известными закономерностями поведения спектра выходного флуктуационного сигнала датчика. Как было отмечено ранее, в спектре можно выделить частотные диапазоны, в которых влияние

расхода фаз различно. Например, существует частотная область, где интенсивность сигнала зависит в основном от расхода жидкости в смеси, и, наоборот, есть частотная область, в которой на интенсивности сигнала сказывается главным образом расход газа.

Следует полагать, что в таких частотных областях общая закономерность связи сигнала с расходом отдельных фаз будет иметь вид, аналогичный соотношению (8). Тогда информационные модели расхода фаз можно описать такими уравнениями:

$$Q_{жс} = K_1^* U_1^\alpha f_1(p) f_3(\beta); \quad (9)$$

$$Q_2 = K_2^* U_2^\gamma f_2(p) f_4(\beta), \quad (10)$$

где U_1 и U_2 – средние квадратичные значения сигнала, вычисленные в диапазонах частот наибольшего влияния жидкости и газа соответственно.

Показатели степени α и γ выбраны отличными от $1/3$, чтобы учесть возможное изменение закономерности связи расхода фаз с сигналом в ограниченном диапазоне частот. Функции $f_i(p)$, $i = 1, 2$ и $f_j(\beta)$, $j = 3, 4$ удобно представить в виде полиномиальных моделей, поскольку на каждой конкретной скважине давление p и расходное газосодержание β изменяются в ограниченных пределах. Кроме того, от функций $f_j(\beta)$, где независимая переменная прямыми методами не определяется, целесообразно перейти к другим полиномиальным функциям, учитывающим влияние расходного газосодержания.

Влияние последнего в уравнениях расхода можно оценить с помощью функций $f(U_{21})$ и $f(U_{12})$, аргументы которых составлены исходя из соотношений:

$$U_{21} = U_2^\gamma / U_1^\alpha; \quad U_{12} = U_1^\alpha U_2^\gamma.$$

Связь U_{21} и U_{12} с расходным газосодержанием следует из уравнений расхода (9) и (10). Действительно, при условии непрерывности функций $f_i(p)$ и $f_j(\beta)$, когда изменения параметров p и β малы, можно написать приближенные равенства:

$$Q_{жс} \approx C U_1^\alpha; \quad Q_2 \approx D U_2^\gamma.$$

где C, D – постоянные коэффициенты.

С другой стороны,

$$\frac{Q_{жс}}{Q_2} = \frac{1}{\beta} - 1; \quad \frac{Q_2}{Q_{жс}} = \frac{\beta}{1-\beta}.$$

С учетом последних рассуждений информационные модели расхода запишем так:

$$Q_{жс} = k_1 U_1^\alpha f_1(p) f(U_{21}); \quad (11)$$

$$Q_2 = k_2 U_2^\gamma f_2(p) f(U_{12}), \quad (12)$$

где k_1, k_2 – постоянные коэффициенты;

$$f_i(p) = 1 + a_i p + b_i p^2, \quad i = 1, 2;$$

$$f(U_{21}) = 1 + c_1 \frac{U_2^\gamma}{U_1^\alpha} + d_1 \frac{U_2^{2\gamma}}{U_1^{2\alpha}};$$

$$f(U_{12}) = 1 + \frac{U_1^\alpha}{U_2^\gamma} + d_2 \frac{U_1^{2\alpha}}{U_2^{2\gamma}},$$

где a_i, b_i, c_i, d_i ($i = 1, 2$) – постоянные параметры полиномиальных моделей.

Как показали результаты экспериментальных исследований, модели расхода фаз (11) и (12) можно существенно упростить при измерении потоков с высоким расходным газосодержанием смеси, когда скоростной режим и другие гидродинамические условия определяются в основном расходом газа. В результате многочисленных лабораторных и промысловых исследований удалось привести их к следующему виду [4]:

$$Q_{жс} = a \cdot D^{0.5} \cdot (U_1 - 0.5 \cdot U_2) \cdot \left(\frac{P}{T}\right)^{0.5}, \quad (13)$$

$$Q_2 = b \cdot D^{0.5} \cdot (U_2 - 0.5 \cdot U_1) \cdot \left(\frac{P}{T}\right)^{0.5}, \quad (14)$$

где a, b – постоянные градуировочные коэффициенты; D – диаметр сужающего устройства.

Информационные модели (13) и (14) содержат всего по одному градуировочному коэффициенту, который несложно определить в промысловых условиях по месту эксплуатации измерительного преобразователя. Процедуры градуировки подробно описаны в [4].

Изложенные положения спектрометрического метода и информационные модели (13) и (14) положены в основу работы созданных информационно-измерительных систем серии «Поток». В настоящее время выпускаются и применяются различные модели этих систем, предназначенные для различных условий эксплуатации скважин. Системы «Поток» отличаются компактностью и надежностью работы в сложных условиях промысловых потоков продукции скважин и в суровых климатических условиях. Ниже приводятся примеры их применения и результаты контрольных измерений.

В табл. 1 приведены результаты измерения дебита газоконденсатной скв. 1312 Уренгойского ГНКМ с помощью системы «Поток-5» в период проведения газоконденсатных исследований (ГКИ) на различных режимах. В качестве контрольных измерительных средств использовали сепаратор (для измерения расхода жидкости) и контрольное средство измерения расхода газа – ДИКТ. Из табл. 1 следует, что точность измерения расхода газа и стабильного конденсата с помощью системы «Поток-5» сопоставима с точностью их измерения традиционным способом (по данным ГКИ).

Таблица 1

Результаты измерений расхода газа сепарации и стабильного конденсата по скв. 1312 с помощью системы «Поток-5»

Режим ГКИ	$P_{уст.газ}$	ГКИ		Поток-5		γ отн.	
		Расход газа сепарации, тыс. м ³ /сут	Расход стабильного конденсата, т/сут	Расход газа сепарации, тыс. м ³ /сут	Расход стабильного конденсата, т/сут	по расходу газа сепарации, %	по расходу стабильного конденсата, %
1	81,5	200,6	17,75	208,9	18,71	-4,14	-5,41
2	84,7	168,0	15,88	174,4	16,10	-3,81	-1,39
3	78,8	241,5	21,06	243,9	20,55	-0,99	2,42
4	82,0	204,5	18,03	204,5	18,03	0,00	0,00

Интересны результаты исследования двух газовых скважин (скв. 322 и 325) Уренгойского ГНКМ (табл. 2, 3), эксплуатируемых с обводнением продукции. Задолго до исследований на скв. 322 были

проведены мероприятия по укреплению призабойной зоны методом остеклования, на скв. 325 таких мероприятий не проводили. В ходе исследований для измерения расходных параметров потока применялись система «Поток-4» и ДИКТ.

Данные табл. 2, 3 свидетельствуют о хорошей сходимости результатов измерения дебита с помощью системы «Поток-4» (столбец 1) и ДИКТ (столбец 4). Приведенные погрешности не превышают 1,6 %. Результаты измерения жидких и твердых примесей в продукции скважин на различных режимах работы отражены в столбцах 2, 3. Из них видно, что в продукции скв. 322 с увеличением дебита концентрация выноса пластовой воды возрастает (см. табл. 2). В то же время выноса песка на всех исследуемых режимах (нулевые показания системы) не наблюдается. В скв. 325 система «Поток-4» регистрирует вынос воды и песка на всех режимах и их увеличение с ростом дебита (см. табл. 3). Причем при переходе к режиму с максимальным дебитом в 700 тыс. м³/сут концентрация песка резко возрастает, и этот режим становится аварийно опасным. Эксплуатация скважины на таком режиме недопустима.

Таблица 2

Результаты измерений дебита газа и выноса примесей
по скв. 322 с помощью системы «Поток-4»

Показания системы «Поток-4»			Дебит газа по ДИКТ, тыс. м ³ /сут	Погрешность измерения дебита	
Дебит газа, тыс. м ³ /сут	Концентра- ция жидких примесей, мл/1000 м ³	Концентра- ция песка, г/1000 м ³		Абсолют- ная, тыс. м ³ /сут	Приведен- ная, %
1	2	3	4	5	6
296,6	229	0	301,1	4,5	1
373,0	284	0	377,2	4,2	0,6
485,1	505	0	472,9	-12,2	-1,6
712,3	856	0	710,4	-1,9	-0,2

В результате исследования многих «сложных» скважин Уренгойского месторождения с помощью системы «Поток-4» удалось определить их предельно допустимые режимы эксплуатации, своевременно принять необходимые меры по ограничению дебита и предотвратить аварийные ситуации.

Таблица 3

Результаты измерений дебита газа и выноса примесей
по скв. 325 с помощью системы «Поток-4»

Показания системы «Поток-4»			Дебит газа по ДИКТ, тыс. м ³ /сут	Погрешности измерения дебита	
Дебит газа, тыс. м ³ /сут	Концентра- ция жидких примесей, мл/1000 м ³	Концен- трация песка, г/1000 м ³		Абсолютная, тыс. м ³ /сут	Приведенная, %
1	2	3	4	5	6
305,9	1,8	0,165	307,9	2,0	0,2
391,2	22	0,447	380,8	-10,4	-1,4
498,9	703	18,01	499,4	-0,5	-0,1
700,1	1347	152,3	698,9	-1,2	-0,15

В заключение отметим, что с учетом многолетнего опыта эксплуатации систем серии «Поток» на Уренгойском ГНКМ, а также на основании результатов значительного количества специальных исследований можно заключить, что эти системы эффективны для оперативного контроля параметров потока продукции на устье скважин. С учетом дополнительно получаемой информации о составе и количестве примесей (воды и песка) системы серии «Поток» являются эффективным средством для оценки и контроля состояния призабойной зоны и пласта.

Список литературы

1. Способ измерения расхода фаз газожидкостного потока: пат. 2105145 Рос. Федерация / Е.Н. Браго, О.В. Ермолкин. – 1998.
2. Фокин Б.С. Исследование пульсационных и сплошных характеристик двухфазного потока / Б.С. Фокин, Е.Н. Гольдберг // Исследование и разработка элементов энергетического оборудования: Труды ЦКТИ. – Л., 1976. – Вып. 138. – С. 38–44
3. Мамаев В.Д. Гидродинамика газожидкостных смесей в трубах / В.Д. Мамаев, Г.Э. Одишария, Н.И. Семенов, А.А. Точигин. – М.: Недра, 1969. – 208 с.
4. Ланчаков Г.А. Оперативный контроль дебита газоконденсатных скважин информационно-измерительными системами «Поток-5» / Г.А. Ланчаков, В.И. Маринин, А.В. Кошелев // Газовая промышленность – 2009. – № 9. – С. 45–51.