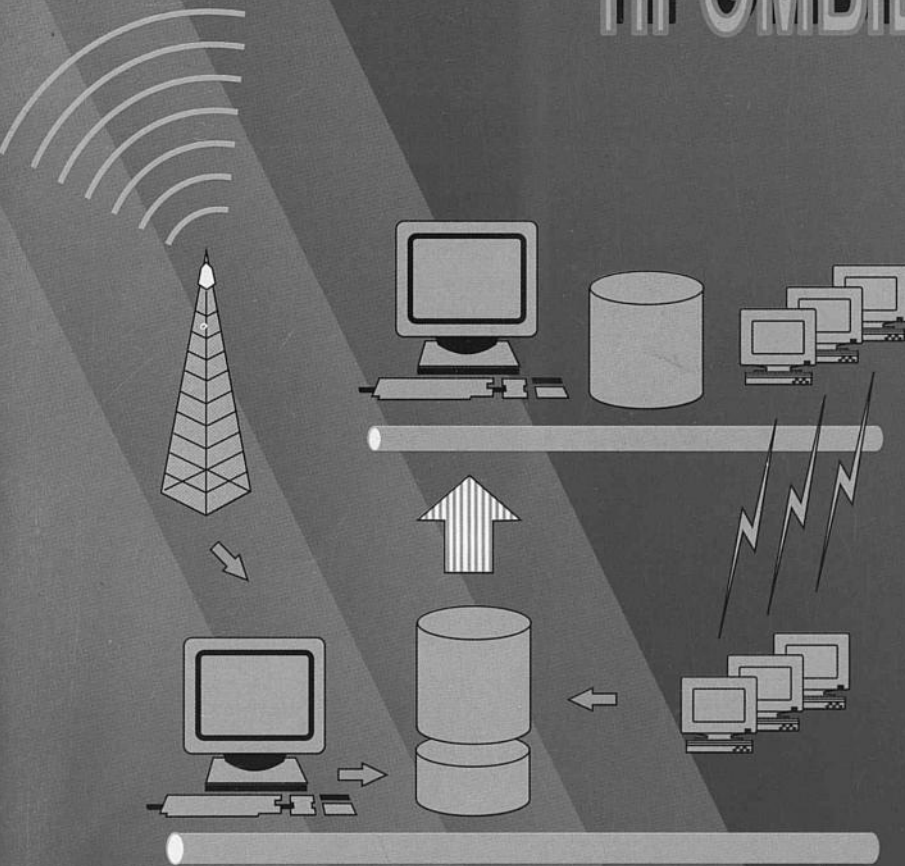


44/04.



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# АВТОМАТИЗАЦИЯ, ТЕЛЕМЕХАНИЗАЦИЯ И СВЯЗЬ В НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



**5.2007**



МОСКВА  
ОАО "ВНИИОЭНГ"

## ОСОБЕННОСТИ НОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ, РЕАЛИЗОВАННОГО В АНАЛИЗАТОРЕ ТОЧЕК РОСЫ ГАЗА "КОНГ-ПРИМА-10"

А.М. Деревягин  
(НПФ "Вымпел", г. Саратов)

Основную долю приборов, используемых в нефтегазовом комплексе для контроля показателей качества товарного газа, составляют гигрометры конденсационного типа, которые непосредственно измеряют температуры точек росы газа по влаге и высшим углеводородам при рабочих давлениях газовой среды. Конденсационные гигрометры различаются между собой системами регистрации выпавшей на зеркале пленки конденсата. Недостатком всех существующих систем регистрации является довольно низкая чувствительность к тонким прозрачным пленкам сконденсировавшегося флюида (в первую очередь, пленкам тяжелых углеводородов). Как следствие – имеющиеся средства измерения не всегда обеспечивают надежное и стабильное измерение точек росы по влаге и углеводородам в среде природных ипутных нефтяных газов.

В разработанном в 2005 г. анализаторе точек росы "КОНГ-Прима-10" для повышения точности и надежности измерения точек росы применен новый способ фиксации момента выпадения флюида из газовой среды [1]. Данный способ имеет высокую чувствительность именно к тонким прозрачным пленкам, толщина которых соизмерима с длиной волны источника излучения. Рассмотрим его принципиальные отличительные особенности.

В классической схеме конденсационного гигрометра световая волна от источника излучения проходит через газообразную среду и попадает на зеркало, представляющее собой полированную металлическую пластину. Образование на пластине пленки конденсата при ее охлаждении определяется по изменению отражающих свойств поверхности. Отличие новой схемы регистрации, примененной в анализаторе, состоит в использовании явления поляризации света при его отражении и преломлении, что принципиально позволяет повысить чувствительность измерительного тракта системы.

Учитывая, что поляризация света всегда происходит при его отражении и преломлении на границе раздела двух диэлектрических сред, для реализации этого подхода конденсационное зеркало анализатора должно быть выполнено из пластины диэлектрика. Электромагнитная оптическая волна, падая на границу раздела двух сред (диэлектрическое зеркало), частично отражается от поверхности раздела, а частично преломляется, переходя во вторую среду. Степень поляризации зависит от угла падения и показателя преломления  $n$  отражающей среды [2].

На рис. 1 представлена схема распространения световых волн от источника света  $S$ . Линия  $AB$  – плоская

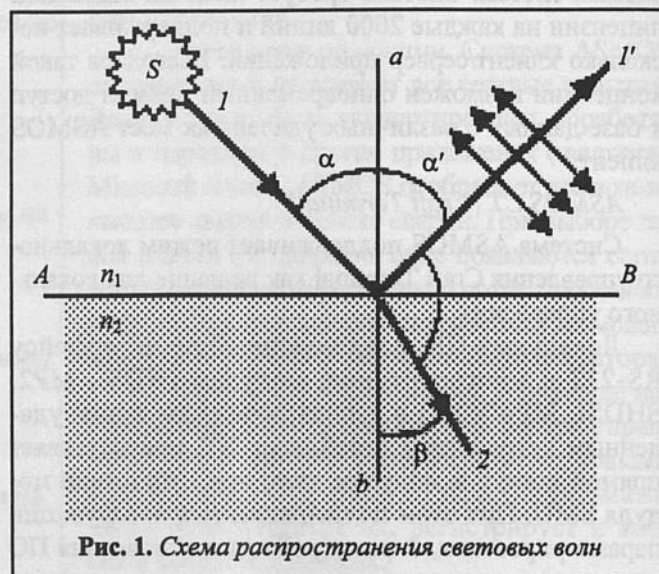


Рис. 1. Схема распространения световых волн

граница раздела сред с показателями преломления  $n_1$  (исследуемый газ) и  $n_2$  (диэлектрическое зеркало). Лучи  $1$ ,  $1'$  и  $2$  – соответственно падающий, отраженный и преломленный, а углы между ними и перпендикуляром  $ab$  к поверхности раздела сред:  $\alpha$  – угол падения,  $\alpha'$  – угол отражения,  $\beta$  – угол преломления.

Соотношения между фазами и амплитудами падающей ( $\varphi^0, A^0$ ), отраженной ( $\varphi^{отп}, A^{отп}$ ) и преломленной ( $\varphi^{пр}, A^{пр}$ ) волн можно найти из граничных условий на границе раздела сред: в первой среде на поле падающей волны накладывается поле отраженной волны; во второй среде имеется поле только преломленной волны.

Плоскую волну, вектор  $E$  которой произвольно ориентирован в пространстве, можно разложить на сумму двух волн, у одной из них  $E_p$  напряженность электрического поля лежит в плоскости падения, а у другой  $E_s$  – перпендикулярно ей.

Для волн  $E_s$  и  $E_p$  связь между амплитудами колебаний выражается формулами Френеля [2]:

$$A_p^{отп} = -A_p^0 \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)},$$

$$A_p^{пр} = A_p^0 \frac{2 \cos \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta) \cdot \cos(\alpha - \beta)}, \quad (1)$$

$$A_s^{отп} = -A_s^0 \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad A_s^{пр} = A_s^0 \frac{2 \cos \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}. \quad (2)$$

Проведем качественный анализ формул (1), (2) для оптической схемы, используемой в первичном преобразователе анализатора, с учетом закона преломления Снеллиуса:



$$\sin \alpha / \sin \beta = n_2 / n_1 = n_{21}. \quad (3)$$

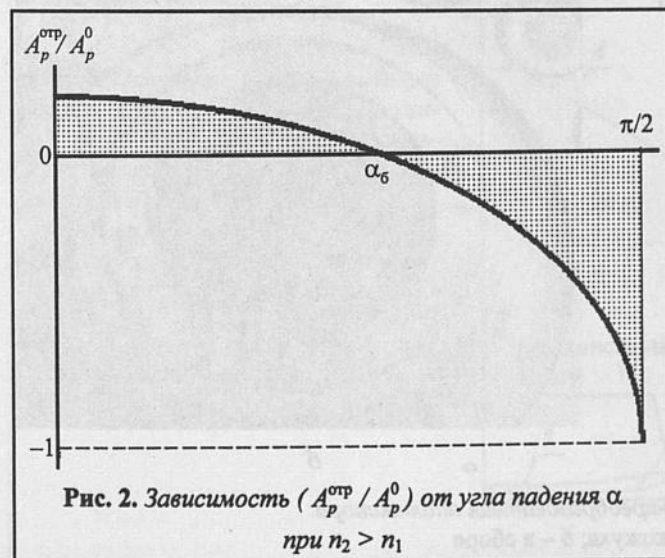
Показатель преломления газов (в том числе и метана) близок к единице, показатель преломления твердых тел (диэлектриков) значительно превышает единицу. Следовательно, световая волна распространяется из оптически менее плотной среды в оптически более плотную ( $n_2 > n_1$ ). Поскольку амплитуды падающей волны  $A_s^0$  и  $A_p^0$  – величины всегда положительные, то из формул (1), (2) следует, что амплитуды преломленной волны  $A_s^{пр}$  и  $A_p^{пр}$  также положительны при любых возможных значениях углов падения и преломления. Это свидетельствует о совпадении фаз преломленной и падающей волн. Амплитуда  $A_s^{пр}$  при отражении света от границы со средой с большим показателем преломления ( $\alpha > \beta$ ) является отрицательной величиной. Это означает, что фаза отраженной волны меняется на  $\pi$ . Зависимость ( $A_p^{пр} / A_p^0$ ) от угла падения  $\alpha$  для случая  $n_2 > n_1$  приведена на рис. 2.

Из графика следует, что при некотором угле падения  $\alpha_6$  амплитуда отраженной волны, лежащей в плоскости падения, становится равной нулю, а при переходе через угол  $\alpha_6$  фаза отраженной волны скачком изменяется на величину  $\pi$ . Угол находится из выражения (1) при условии  $A_p^{пр} / A_p^0 = 0$ , т. е. когда  $\operatorname{tg}(\alpha + \beta)$  стремится к бесконечности и, следовательно,  $\alpha_6 + \beta_6 = \pi/2$ . С учетом закона Снеллиуса (3) в итоге получаем

$$\operatorname{tg} \alpha_6 = n_2 / n_1. \quad (4)$$

Формула (4) называется соотношением (законом) Брюстера, а угол  $\alpha_6$  – углом Брюстера.

Таким образом, в соответствии с законом Брюстера, естественный свет при отражении от диэлектриков полностью поляризуется, если тангенс угла падения численно равен относительному показателю преломления отражающей пластины (углу Брюстера). При дальнейшем увеличении угла падения доля поляризованного света вновь уменьшается. При падении света под углом Брюстера луч отраженный и луч преломленный взаимно перпендикулярны, а колебания



электрического вектора поляризованного излучения происходят перпендикулярно плоскости падения.

Из приведенного выше анализа следует, что в соответствии с принципом суперпозиции, при освещении диэлектрического зеркала поляризованным в плоскости падения светом (от лазерного источника) и выполнении условия (4), отраженная волна отсутствует и весь падающий свет полностью преломляется в диэлектрическое зеркало. Таким образом, реализация условия (4) позволяет с высокой степенью точности идентифицировать наличие на зеркале анализатора любой дополнительной пленки, если ее показатель преломления отличен от показателя преломления материала зеркала, поскольку образование на зеркале пленки жидкого (или твердого) флюида нарушает условие Брюстера и приводит к появлению отраженной волны.

При наличии на зеркале пленки флюида прохождение света от источника излучения осуществляется через три физически различные среды:

- газообразную (исследуемый газ);
- жидкую (сконденсировавшийся флюид при охлаждении зеркала);
- твердую, представляющую собой конденсационное зеркало гигрометра.

На рис. 3 приведена схема распространения световых волн в оптической схеме первичного преобразователя анализатора.

Конденсационное зеркало 3 освещается источником света S, свет которого поляризован в плоскости падения (плоскости рисунка) под углом  $\alpha$ . Величина угла  $\alpha$  удовлетворяет условию (4). В этом случае свет будет падать на конденсационное зеркало под углом Брюстера. Следовательно, при отсутствии на зеркале сконденсированной пленки, линейно поляризованный свет источника излучения, падающий на границу раздела сред 1–3 (газ – зеркало), полностью преломляется в среду 3, а отраженная волна будет отсутствовать.

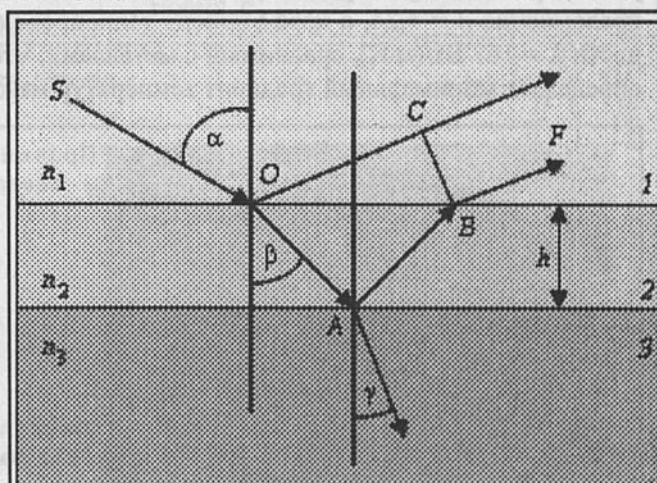


Рис. 3. Схема распространения света при наличии на зеркале пленки конденсата:  
1 – исследуемый газ с показателем преломления  $n_1$ ; 2 – пленка сконденсированного флюида, имеющая показатель преломления  $n_2$  и толщину  $h$ ; 3 – диэлектрическое зеркало, имеющее показатель преломления  $n_3$ ; S – источник излучения; F – приемник излучения

При появлении на зеркале пленки флюида 2, некоторой толщины  $h$  и имеющей показатель преломления  $n_2$ , отличный от  $n_3$ , соотношение Брюстера нарушается: появляется отраженная волна от границы раздела сред 1-2 (газ-пленка). Кроме того, ввиду оптической прозрачности сконденсированной пленки, происходит разделение падающего пучка света по амплитуде. В результате падающий луч  $SO$  частично отражается, а частично преломляется во вторую среду. Луч  $OA$ , в свою очередь, частично отражается от конденсационного зеркала 3, а частично преломляется в пластину зеркала 3. Получающиеся лучи  $OF$  и  $BF$  интерферируют, а отрезок  $CB$  является фронтом плоской волны.

В итоге для разности хода лучей получаем [3]

$$\Delta = 2h \cdot n_2 \cos \beta + \lambda/2 = 2h \cdot n_1 \sin \alpha \operatorname{ctg} \beta + \lambda/2. \quad (5)$$

Разность фаз между лучами, приходящими к приемнику  $F$ , будет описываться следующим выражением:

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} h \cdot n_2 \cos \beta + \pi = \frac{4\pi}{\lambda} h \cdot n_1 \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta + \pi. \quad (6)$$

Как видно из выражения (6), разность фаз интерферирующих лучей является функцией толщины пленки  $h$ . Следовательно, интенсивность приходящего на фотоприемник света будет периодической функцией от толщины пленки  $h$ .

Анализ чувствительности схемы к образованию пленки флюида, проведенный на основании зависимости (6), показывает, что с повышением показателя преломления материала диэлектрического зеркала увеличивается амплитуда отраженного интерференционного сигнала.

Из условия обеспечения максимальной чувствительности, химической стойкости к агрессивным средам и хорошей теплопроводности в качестве материала зеркала выбран кремний, имеющий показатель преломления  $n = 4,24$ , а коэффициент теплопроводности  $\lambda = 167$  Вт/(м·К), сравнимый с металлами, что определяет минимальный градиент температур меж-

ду измеряемой термодатчиком температурой и действительной температурой поверхности зеркала. Угол Брюстера для границы сред "метан – кремний" составляет  $76,73^\circ$ .

Для определения физической природы конденсирующихся из газа флюидов (влаги и/или углеводородов) могут быть использованы различия в отражающих свойствах образующейся на зеркале пленки. Из-за существенно разных коэффициентов поверхностного натяжения влаги и углеводородов структуры пленки углеводородов и воды на поверхности зеркала качественно различаются (пленка углеводородов – равномерная и однородная, а пленка водной фазы – неоднородная и как бы состоящая из множества микрокапель). В связи с этим разные по физической природе пленки конденсата перераспределяют отраженный световой поток по-разному. В случае конденсации на зеркале углеводородных фракций происходит направленное отражение света от поверхности пленки, а в случае конденсации влаги – диффузное отражение.

В связи с рассмотренной выше физической картиной конденсации для определения момента конденсации, а также идентификации конденсирующихся из газа влаги и углеводородов в первичном преобразователе анализатора используются три приемника света. Приемники света расположены в соответствии с рис. 4 и фиксируют направленное отражение (фотоприемник напротив световода), диффузное отражение (фотоприемник слева от световода) и комбинированное отражение (фотоприемник справа от направления светового потока).

Поляризованный лазерный луч через световод под углом Брюстера направляется на кремниевое зеркало, припаянное к термоэлектронной батарее (предназначенной для управления температурой зеркала). При чистом зеркале (т. е. отсутствии на нем пленки жидкости) весь падающий свет оказывается преломленным и отраженная волна отсутствует. При охлаждении зеркала и появлении пленки флюида часть светового потока отражается из-за нарушения условия



Рис. 4. Внешний вид первичного преобразователя анализатора: а – без защитного кожуха; б – в сборе



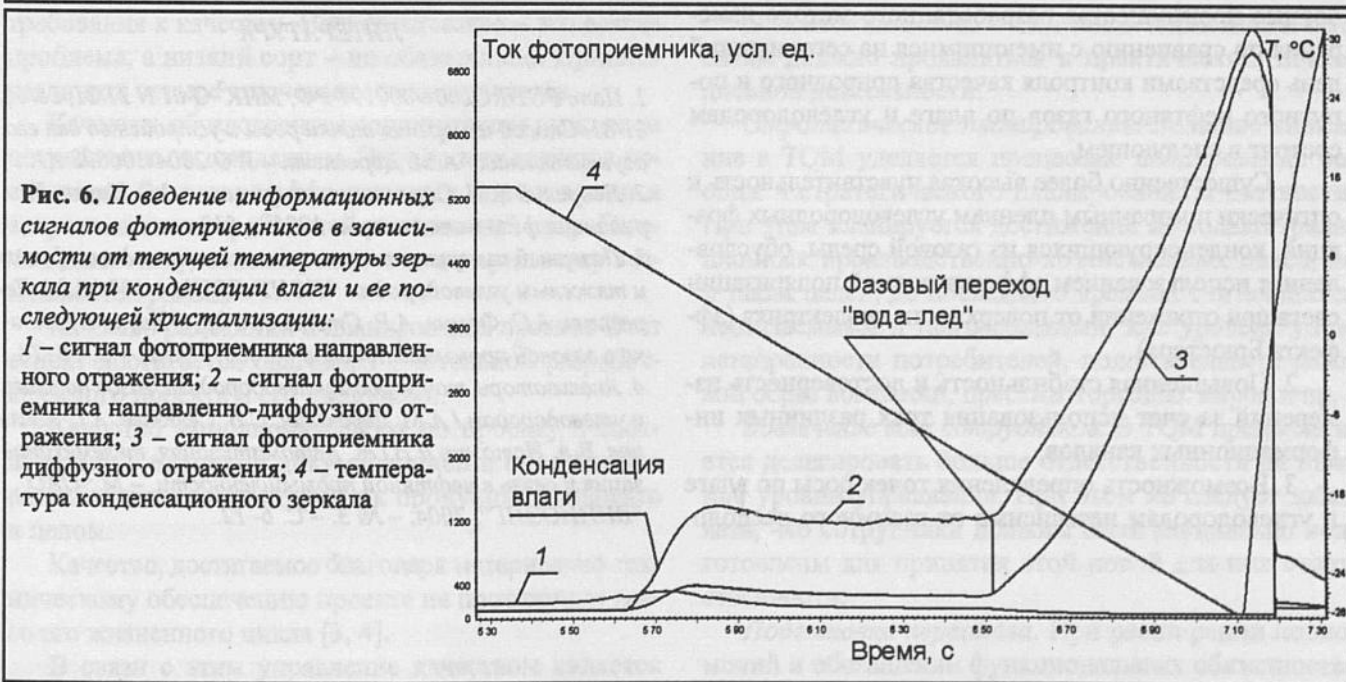
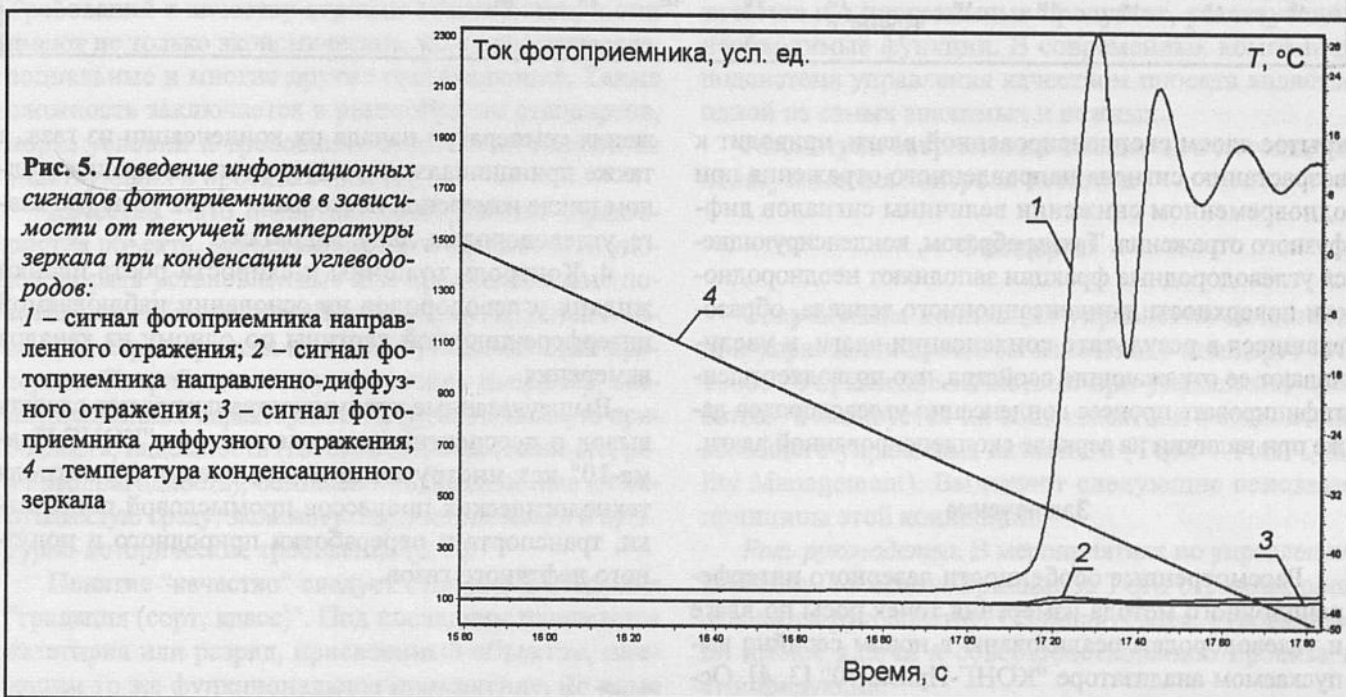
Брюстера. Образование на зеркале равномерной однородной пленки углеводородов приводит к появлению двух отраженных сигналов, которые могут усиливать или ослаблять друг друга в зависимости от толщины пленки флюида. Эти изменения фиксируются фотоприемником, установленным напротив источника излучения и фиксирующим направленное отражение света.

Поведение информационных сигналов при конденсации углеводородов представлено на рис. 5. Образование на зеркале неоднородной пленки влаги, конденсирующейся в виде капель, приводит к возникновению направленно-диффузного отражения, которое по мере роста капель или их кристаллизации (замерзания) переходит в диффузное отражение (рис. 6) и фиксируется соответствующими фотоприемниками.

Таким образом, наличие трех информационных каналов (т. е. трех приемников фотосигнала) дает воз-

можность однозначно и с высокой степенью точности идентифицировать конденсацию на зеркале анализатора углеводородов и влаги, а также дополнительно определять момент фазового перехода "вода-лед" (или же "вода-газовый гидрат" в зависимости от состава и давления газовой среды). При этом важно отметить, что температуры точек росы газа по влаге и углеводородам могут определяться независимо от их взаимного (по температуре начала конденсации) расположения.

В качестве подтверждения данного вывода на рис. 7 приведен график изменения информационных сигналов анализатора при конденсации углеводородов на зеркало, покрытое пленкой сконденсированной ранее влаги. Из графика следует, что при конденсации на зеркале влаги, определяемой по возрастанию сигнала направленно-диффузного и диффузного отражения, конденсация углеводородов на зеркало, по-



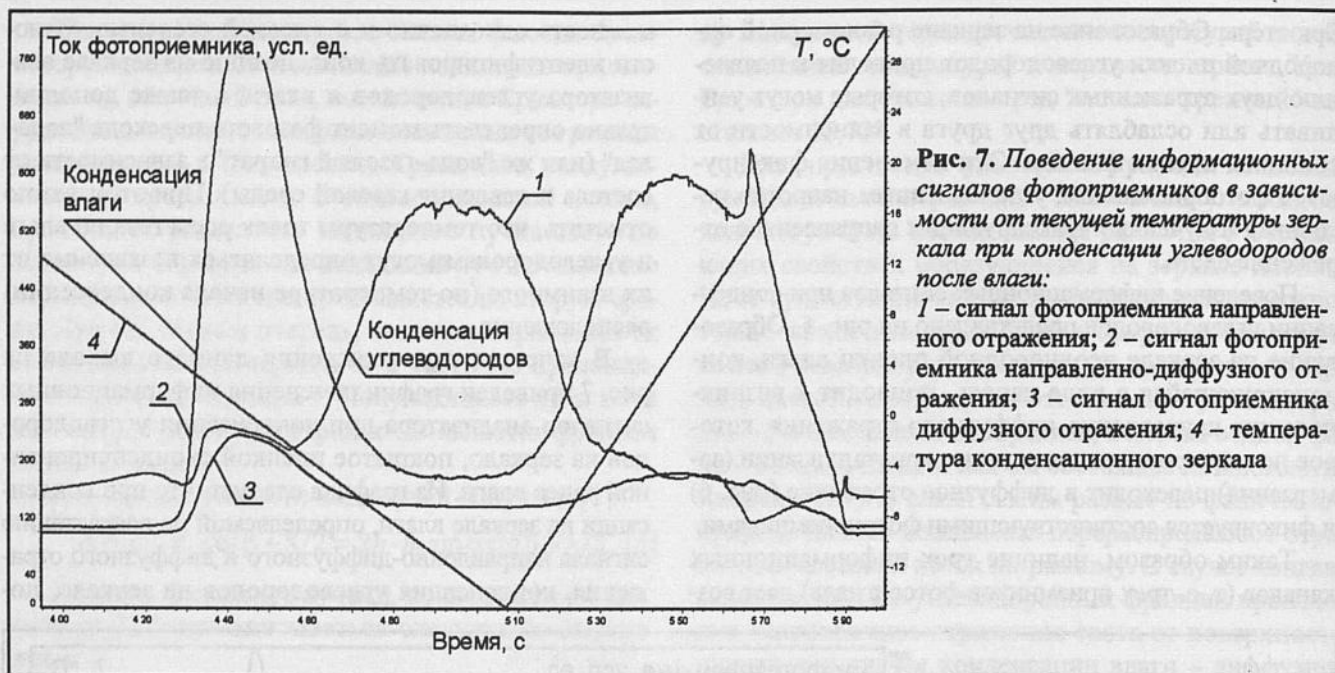


Рис. 7. Поведение информационных сигналов фотоприемников в зависимости от текущей температуры зеркала при конденсации углеводородов после влаги:

1 - сигнал фотоприемника направленного отражения; 2 - сигнал фотоприемника направленно-диффузного отражения; 3 - сигнал фотоприемника диффузного отражения; 4 - температура конденсационного зеркала

крытое слоем сконденсированной влаги, приводит к возрастанию сигнала направленного отражения при одновременном снижении величины сигналов диффузного отражения. Таким образом, конденсирующиеся углеводородные фракции заполняют неоднородности поверхности конденсационного зеркала, образовавшиеся в результате конденсации влаги, и увеличивают ее отражающие свойства, что позволяет идентифицировать процесс конденсации углеводородов даже при наличии на зеркале сконденсированной влаги.

### Заключение

Рассмотренные особенности лазерного интерференционного метода измерения точек росы по влаге и углеводородам реализованы в новом серийно выпускаемом анализаторе "КОНГ-Прима-10" [3, 4]. Основные преимущества разработанного метода измерения по сравнению с имеющимися на сегодняшний день средствами контроля качества природного и попутного нефтяного газов по влаге и углеводородам состоят в следующем.

1. Существенно более высокая чувствительность к оптически прозрачным пленкам углеводородных фракций, конденсирующихся из газовой среды, обусловленная использованием эффекта полной поляризации света при отражении от поверхности диэлектрика (эффекта Брюстера).

2. Повышенная стабильность и достоверность измерений за счет использования трех различных информационных каналов.

3. Возможность определения точек росы по влаге и углеводородам независимо от взаимного располо-

жения температур начала их конденсации из газа, а также принципиальная возможность измерения в одном цикле измерения нескольких точек росы (по влаге, углеводородам, льду, гидратам).

4. Контроль толщины и скорости роста пленки жидких углеводородов на основании наблюдаемой интерференционной картины по одному из каналов измерения.

Вышеуказанные преимущества позволяют сделать вывод о перспективности анализатора "КОНГ-Прима-10" как инструмента исследования и контроля технологических процессов промышленной подготовки, транспорта и переработки природного и попутного нефтяного газов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. РСТ/RU2004/000197 РФ, МПК<sup>7</sup> G 01 N 21/21, 25/66, 21/81. Способ измерения точки росы и устройство для его осуществления / А.М. Деревягин. - WO 2004/106898 A1.
2. Яворский Б.М. Справочник по физике. - М.: Наука. Гл. редакция физ.-мат. лит.-ры, 1985. - 512 с.
3. Лазерный измеритель точек росы газа по водным фазам и тяжелым углеводородам "КОНГ-ПРИМА-10" / А.М. Деревягин, А.С. Фомин, А.Р. Степанов и др. // Наука и техника в газовой промышленности. - 2005. - № 1. - С. 70-78.
4. Анализаторы точек росы углеводородных газов по влаге и углеводородам / А.М. Деревягин, С.В. Селезнев, А.Г. Агальцов, В.А. Истомин // НТЖ. Автоматизация, телемеханика и связь в нефтяной промышленности. - М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2004. - № 3. - С. 6-12.