

# ЭЛЕМЕНТ НА ПОВЕРХНОСТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ БЕЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ КАК АНАЛИЗАТОР ГАЗОВ И ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ.

## Ч. 8. РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ДВОЙНОЙ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ ДЛЯ БИНАРНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ<sup>1</sup>

Э. И. Соборовер, С. Г. Бессонов, А. Ю. Абашкин, Е. С. Орлов

Приведены результаты исследования эффекта газовой нагрузки в присутствии различных бинарных газовых смесей в вакууме и в газодинамическом режиме. Получены зависимости изменения диффПАВ-частоты от давления в вакууме азота, кислорода, аргона, оксида углерода, диоксида углерода и бинарных смесей. Сравнение рассчитанных значений ПАВ-сенсорной чувствительности с экспериментальными данными показало их хорошую сходимость.

*Ключевые слова:* поверхностно-акустическая волна, двойная линия задержки, бинарный газ, сенсорная чувствительность, давление газов.

### ВВЕДЕНИЕ

Как было показано ранее [1—3], зависимость изменения частоты  $\Delta F$  датчика на поверхностно-акустических волнах (ПАВ-датчик) в конструкции “двойная линия задержки на ПАВ” (ДЛЗ), выполненной на монокристаллах кварца АТ-среза без чувствительного покрытия, от давления воздуха  $p$  в вакууме в интервале от нуля до атмосферного, описываются линейной функцией вида:  $\Delta F = A_f p + B_f$  [1]. Далее было установлено, что величина чувствительности изменения дифференциальной ПАВ-частоты (диффПАВ-частота)  $A_f$  от давления воздуха, входит в устойчивые корреляции с его физическими параметрами: молекулярной массой  $M_m$ , вязкостью  $\eta$  и др. наравне с данными для индивидуальных газов. Однако, как известно, воздух в первом приближении является бинарной газовой смесью азота и кислорода. Кроме этого, ранее было показано, что ПАВ-датчик в конструкции “одинарная линия задержки на ПАВ без чувствительного покрытия” может быть использован в качестве анализатора количественного состава псевдобинарных газовых смесей метана и пропана с воздухом [2]. Поэтому, целью данной работы стало проведение исследований эффекта газовой нагрузки на ПАВ-датчик в конструкции “двойная линия задержки на ПАВ без чувствительного покрытия” в присутствии различных бинарных газовых смесей в вакууме и в газодинамическом режиме.

Были поставлены следующие экспериментальные задачи:

1) получить зависимости изменений диффПАВ-частоты от давления в вакууме некоторых широко распространенных в технике газов и их смесей;

2) рассчитать величины ПАВ-сенсорной чувствительности  $A_f$  для индивидуальных газов и бинарных газовых смесей, состоящих из этих газов, из экспериментальных данных;

3) сравнить величины  $A_f$  газовых смесей, полученных из экспериментальных данных, с рассчитанными из величин  $A_f$  индивидуальных газов по соотношению:

$$1/A_{\text{смесь}} = N_1/A_1 + N_2/A_2, \quad (1)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  — мольные или объемные доли индивидуальных газов 1 и 2 в смеси соответственно;  $A_1$  и  $A_2$  — величины ПАВ-сенсорной чувствительности индивидуальных газов 1 и 2 соответственно;

4) провести измерения дифференциальной ПАВ-частоты в динамическом режиме напуска газов и газовых смесей фреона-134А с воздухом;

5) по экспериментальным данным построить фазовую диаграмму в координатах: [величина отклика ПАВ-датчика] — [% содержание фреона-134А в потоке воздуха] и рассмотреть возможность ее практического применения для количественного контроля фреона-134А в воздухе.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для измерений использовались образцы ПАВ-элементов, электронные ВЧ-усилители, диодно-кольцевой смеситель, измерительная ячейка, измерительная установка, вакуумная система напуска газов, включающая универсальный газовый стенд (УГС), подробно описанные ранее [3, 4].

<sup>1</sup> Продолжение серии статей, опубликованных в №№ 1, 2, 5, 7, 11, 2005, № 4, 2006, № 4, 2010 нашего журнала.

Образцы для измерений представляют собой двойную ЛЗ на ПАВ, состоящую из двух одинаковых ПАВ-элементов в конструкции “одинарная ЛЗ” с базовой частотой около 170 МГц, каждый из которых выполнен на отдельном монокристалле кварца АТ-среза с двумя встречно-штырьевыми преобразователями (ВШП) из алюминия. Каждый из ПАВ-элементов двойной ЛЗ включен в цепь обратной связи своего ВЧ-усилителя, которые аналогичны для обоих ПАВ-элементов, образующих двойную ЛЗ; ПАВ-частоты обоих генераторов поступают на диодно-кольцевой смеситель. Разностная или дифференциальная ПАВ-частота (диффПАВ-частота) является аналитическим откликом ПАВ-датчика в конструкции двойной ЛЗ. В работе использованы два ПАВ-датчика в конструкции “двойная ЛЗ” с двумя различными парами ПАВ-элементов в конструкции “одинарная ЛЗ”. Одна из пар ПАВ-элементов, составляющих ПАВ-датчик в конструкции “двойная ЛЗ”, имеет зависимости диффПАВ-частоты от давления газов и газовых смесей в вакууме с экстремумом, который был предсказан нами ранее на основании теоретических рассуждений и наблюдался экспериментально [1]. Другая пара ПАВ-элементов, составляющих ПАВ-датчик в конструкции “двойная ЛЗ” имеет простую линейную зависимость диффПАВ-частоты от давления газов и газовых смесей в вакууме без экстремума.

*Электронная схема ПАВ-датчика в конструкции “двойная ЛЗ”.* Для выделения четырех основных частот: двух базовых частот ЛЗ, их разностной и суммарной составляющих ПАВ-линии задержки соединены через диодно-кольцевой смеситель [5]. Низкочастотный фильтр выделяет только разностную составляющую, которая является базовой частотой двойной ЛЗ (далее диффПАВ-частота). Сформированный таким образом сигнал поступает на вход частотомера. Каждый ПАВ-элемент включен в цепь обратной связи своего усилителя, компенсирующего все потери энергии ПАВ-волны, проходящей по поверхности пьезоэлектрика между ВШП. В состав ВЧ-усилителей входят варикапы, что позволяет реализовать функцию активного фазовращателя.

*Конструкция измерительной ячейки.* На дне ячейки закреплены два корпуса ВЧ-усилителей; оба ПАВ-элемента размещены на основаниях стандартных корпусов для микросхем, а их выводы входят в отверстия в верхней крышке корпусов ВЧ-усилителей, осуществляя омические контакты со схемами усилителей. Крышка корпуса ячейки имеет вакуумное уплотнение по периметру ячейки. В одну из боковых стенок ячейки вмонтирован газовый штуцер, который соединяется с УГС, через который осуществляются все вакуумно-газовые коммутации. Для напуска газов и газовых смесей в динамическом режиме использовалась

крышка измерительной ячейки с вмонтированными в нее двумя газовыми штуцерами, концы которых находились строго фиксированно над поверхностями ПАВ-элементов, образующих ПАВ-датчик. Причем, имелась возможность подачи газового потока на любой из двух ПАВ-элементов, входящих в двойную ЛЗ.

*Измерительная система.* В состав измерительной системы входят: измерительная ячейка, источник Б5-7 для питания ВЧ-усилителей, частотомер электронно-счетный универсальный ЧЗ-33, вольтметр В7-38 для контроля величины напряжения питания ВЧ-усилителей.

*Газы.* В работе использовали газы из ГОСТИрованных 40-литровых баллонов без предварительной очистки и осушки: азот, кислород, оксид углерода, диоксид углерода, аргон и искусственный воздух, приготовленный из кислорода и азота в соотношении 20/80. В работе использовался баллон с ожиженным фреоном-134А. Фреоно-воздушные смеси приготавливались из фреона-134А и искусственного воздуха методом статического разбавления с точностью 1 % об. Состав приготовленных газовых смесей контролировался с помощью масс-спектрометра.

Для создания газовых смесей фреона с воздухом в динамическом режиме напуска использовался лабораторный воздух, отфильтрованный последовательно противопыльным защитным фильтром из газового редуктора, промышленным фильтром ФВ-1. 6, противогазной коробкой марки М. Система напуска газовых потоков была подробно описана ранее [6], тем не менее укажем, что фреоно-воздушные смеси приготавливались в форбаллоне емкостью 1,5 л, из которого они вытеснялись лабораторным воздухом, нагнетаемым мембранным насосом со скоростью 500 см<sup>3</sup>/мин, поддерживаемой постоянной с помощью электронного регулятора расхода газов (РРГ).

*Методика проведения измерений дифференциальной ПАВ-частоты в присутствии газов и газовых смесей в вакууме.* После прогона измерительной системы и выхода диффПАВ-частоты на стационарное значение измерительная ячейка вакуумировалась с помощью форвакуумного насоса 3 НВР-1Д до остаточного давления воздуха около 10<sup>-3</sup> мм рт. ст. (контроль по показаниям термометрического вакуумметра ВТ-2А). После выхода диффПАВ-частоты в вакууме на стационарное значение  $F_0$  производился ступенчатый напуск газа до максимального давления. Давление газа  $p_i$  контролировалось образцовым мановакуумметром. Зависимость изменений диффПАВ-частоты  $\Delta F = F_i - F_0$  от давления газа в вакууме, полученную в данном режиме напуска газов и газовых смесей, считалась “прямой”. Далее проводилось ступенчатое, контролируемое мановакуумметром,

удаление газа из измерительной ячейки. Полученная в данном режиме зависимость изменений диффПАВ-частоты  $\Delta F = F_i - F_0$  от давления газа в вакууме считалась “обратной”.

*Методика проведения измерений дифференциальной ПАВ-частоты в динамическом режиме напуска газов и газовых смесей.* Вначале на образец ПАВ-датчика подавался постоянный поток лабораторного воздуха ( $500 \text{ см}^3/\text{мин}$ ) до установления стационарного значения диффПАВ-частоты, что занимало несколько минут. Перед напуском фреоно-воздушных смесей производился замер кратковременных шумов ПАВ-датчика (в течение 1 мин с интервалом 1 с). Затем поток лабораторного воздуха с помощью газовых кранов УГС переключался на форбаллон с предварительно приготовленной фреоно-воздушной смесью, которая направлялась на один из ПАВ-элементов, входящих в двойную ЛЗ ПАВ-датчика. После подачи очередной фреоно-воздушной смеси измерительная ячейка продувалась чистым лабораторным воздухом до стационарного значения диффПАВ-частоты. Затем производили подачу следующей фреоно-воздушной смеси. Смеси подавались последовательно, начиная с самой малой концентрации фреона, до максимальной.

*Математическая обработка полученных данных.* Полученные зависимости  $\Delta F$  (Гц) от  $p$  газов в вакууме обрабатывались методом наименьших квадратов (МНК); использовалась программа по аппроксимации экспериментальных данных МНК, включающая набор из 16-и наиболее распространенных в физике и химии функций.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

### Исследование зависимости дифференциальной ПАВ-частоты от давления индивидуальных газов и газовых смесей в вакууме

Вначале проверили выполнение правила аддитивности величин ПАВ-сенсорной чувствительности  $A_f$  для воздуха и его основных компонентов азота и кислорода. Для расчета величины

Таблица 1

Величины ПАВ-сенсорной чувствительности воздуха и его компонентов, рассчитанные МНК из экспериментальных зависимостей диффПАВ-частоты от давления газов в вакууме

Газ	$-A_f \cdot 10^3, \text{ Гц/Па}$	$-A_f \cdot 10^3, \text{ Гц/Па}$ (расчет по соотношению (1))
O <sub>2</sub>	$(7,59 \pm 0,23)$	—
N <sub>2</sub>	$(6,47 \pm 0,30)$	—
Воздух	$(7,37 \pm 0,15)$	$(6,7 \pm 0,7)$

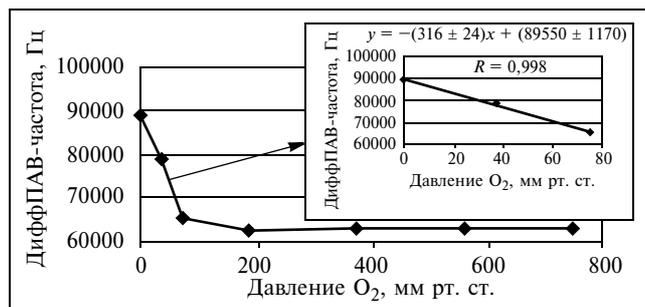


Рис. 1. Зависимость диффПАВ-частоты от давления O<sub>2</sub> в вакууме, полученная ступенчатым вакуумированием

ПАВ-сенсорной чувствительности воздуха по соотношению (1) из данных табл. 1 [1] были взяты соответствующие величины ПАВ-сенсорной чувствительности для азота и кислорода, рассчитанные из обратных измерений. Как видно из данных таблицы с точностью до приведенной погрешности наблюдается сходимость величины ПАВ-сенсорной чувствительности, рассчитанной из экспериментальных данных по зависимости диффПАВ-частоты от давления воздуха в вакууме, с аналогичной величиной, рассчитанной по соотношению (1), данному в приближении выполнения аддитивности величин ПАВ-сенсорной чувствительности для двух основных компонентов воздуха: азота и кислорода.

На рис. 1 представлены типичные кривые изменений диффПАВ-частоты при напусках газов и газовых смесей в вакууме на паре ПАВ-элементов, входящих в состав ПАВ-датчика в конструкции “двойная линия задержки на ПАВ без чувствительного покрытия”, для которых на градуировочных характеристиках наблюдается экстремум. Как видно из рисунка величины ПАВ-сенсорной чувствительности  $A_f$  в области относительно малых давлений газов в вакууме на три порядка больше, чем соответствующие величины в области относительно больших давлений. Поэтому для анализа бинарных смесей газов были выбраны именно величины  $A_f$ , рассчитанные для области относительно малых давлений газов. Как видно из данных рис. 1 (врезка) зависимости изменений диффПАВ-частоты от давления газов в вакууме в области от нуля до 75 мм рт. ст. хорошо описываются линейными уравнениями вида:  $F = A_f p + B_f$ .

Данные для величин ПАВ-сенсорной чувствительности  $A_f$ , рассчитанные методом МНК для индивидуальных газов, сведены в табл. 2, а для газовых смесей — в табл. 3 (2-й столбец). Далее по соотношению (1) с использованием величин  $A_f$  для индивидуальных газов, взятых из табл. 2, были рассчитаны величины  $A_f$  для трех бинарных газовых смесей, которые сведены в табл. 3 (3-й столбец). Данные табл. 3 показывают, что величины

ПАВ-сенсорной чувствительности газовых смесей, рассчитанные по соотношению (1) из данных для индивидуальных газов —  $A_{f\text{расч}}$ , удовлетворительно согласуются с величинами  $A_{f\text{эксп}}$ , рассчитанными из экспериментальных кривых (зависимостей диффПАВ-частоты от давления бинарных газовых смесей в вакууме). Таким образом, установлено выполнение правила аддитивности величин ПАВ-сенсорной чувствительности для бинарных газовых смесей, состоящих из кислорода, азота, аргона, оксида углерода и диоксида углерода.

В связи с тем, что ранее была показана перспективность использования ПАВ-датчика в конструкции “двойная линия задержки на ПАВ без чувствительного покрытия” в качестве датчика течеискателя фреона-134А в воздух [4], практический интерес представляло получение данных по влиянию давления бинарных смесей фреона с воздухом в вакууме на диффПАВ-частоту. Данные по влиянию давления газовых смесей фреона с воздухом  $p$  в вакууме на диффПАВ-частоту были получены на другой паре ПАВ-элементов, составляющих двойную линию задержки на ПАВ, для которой наблюдаются простые линейные зависимости диффПАВ-частоты от давления газов и газовых смесей в вакууме в диапазоне давлений от нуля до атмосферного без экстремума (рис. 2). Данные табл. 4 показывают закономерный рост величины ПАВ-сенсорной чувствительности  $A_f$  с возрастанием содержания фреона-134А в смеси с воздухом, который наблюдается как для прямого процесса измерения диффПАВ-частоты в присутствии газовых смесей в вакууме, так и для обратного процесса измерений диффПАВ-частоты

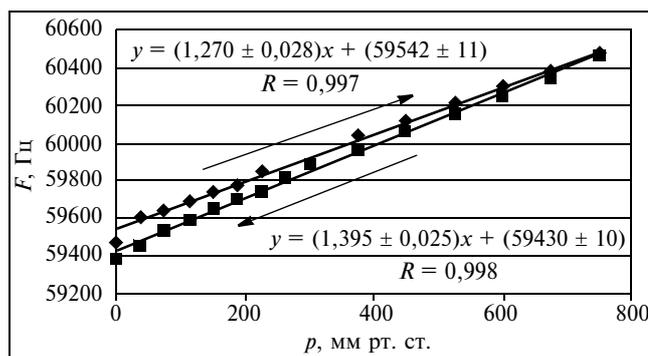


Рис. 2. Зависимости диффПАВ-частоты от давления смеси (фреон-134А + воздух) для состава 80 %: 20 % в вакууме

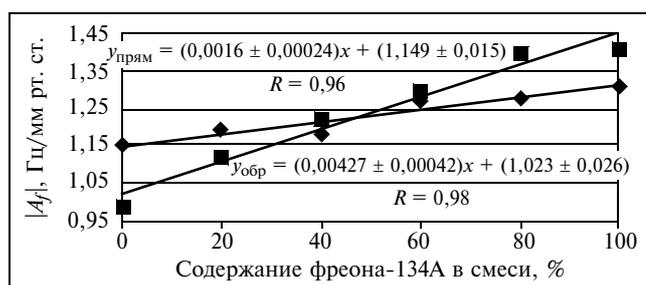


Рис. 3. Фазовые диаграммы для бинарной газовой смеси фреона-134А с воздухом в координатах: [величина ПАВ-сенсорной чувствительности  $A_f$ ] — [% фреона-134А в смеси], построенные по данным, полученным в прямом и обратном процессах измерений диффПАВ-частоты от давления газов и газовых смесей в вакууме

(рис. 3). Фазовые диаграммы в координатах: [величина ПАВ-сенсорной чувствительности  $A_f$ ] — [% фреона-134А в смеси], построенные по данным, полученным в прямом и обратном процессах измерений диффПАВ-частоты от давления газов в вакууме, удовлетворительно описываются линейными функциями. Переход в фазовой диаграмме от координаты [% фреона-134А в смеси] к любому физическому параметру, например, к  $M_{\text{расч}}$  — усредненным молекулярным массам бинарных газовых смесей фреона-134А с воздухом, рассчитанным по соотношению (1) (см. табл. 4), приводит к усложнению вида кривой. Аппроксимация кривой фазовой диаграммы в координатах: [величина ПАВ-сенсорной чувствительности  $A_f$ ] — [ $M_{\text{расч}}$ ] набором из 16-и функций показывает, что наилучшим образом кривая описывается функцией, являющейся математическим выражением изотермы Ленгмюра:  $Y = X/(A_f X + B_f)$ .

Для прямых измерений:  $A_f = (0,7223 \pm 0,0090)$ ,  $B_f = (4,18 \pm 0,53)$ ,  $R = 0,999$ .

Для обратных измерений:  $A_f = (0,602 \pm 0,029)$ ,  $B_f = (9,7 \pm 1,7)$ ,  $R = 0,996$ .

Таблица 2

Значения ПАВ-сенсорной чувствительности, рассчитанные методом МНК из экспериментальных зависимостей диффПАВ-частоты от давления газов в вакууме

Газ	$-A_f$ , Гц/мм рт. ст.
O <sub>2</sub>	316 ± 24
Ar	373 ± 73
CO	277 ± 41
CO <sub>2</sub>	232 ± 18

Таблица 3

Сравнение величин ПАВ-сенсорной чувствительности газовых смесей, рассчитанных из экспериментальных данных и по соотношению (1)

Смесь	$ A_{f\text{эксп}} $ , Гц/мм рт. ст.	$ A_{f\text{расч}} $ , Гц/мм рт. ст.
O <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> (1:1)	(261 ± 32)	(267 ± 68)
O <sub>2</sub> + Ar (1:3)	(317 ± 46)	(332 ± 75)
O <sub>2</sub> + CO (10:1)	(317 ± 67)	(312 ± 71)

Значения ПАВ-сенсорной чувствительности  $A_f$ , рассчитанные методом МНК из линейных функций  $F = A_f p + B_f$  для бинарных газовых смесей фреона-134А с воздухом, полученные для прямых и обратных измерений в вакууме

Содержание фреона в смеси, %	$M_{\text{расч}}^*$	$-A_{f \text{ прям}},$ Гц/мм рт. ст.	$R_{\text{прям}}$	$-A_{f \text{ обр}},$ Гц/мм рт. ст.	$R_{\text{обр}}$
0	29,00	(1,153 ± 0,016)	0,999	(0,989 ± 0,045)	0,991
20	33,84	(1,182 ± 0,037)	0,995	(1,117 ± 0,048)	0,992
40	40,63	(1,189 ± 0,057)	0,994	(1,22 ± 0,12)	0,973
60	50,82	(1,270 ± 0,028)	0,997	(1,292 ± 0,062)	0,991
80	67,84	(1,275 ± 0,062)	0,991	(1,395 ± 0,025)	0,998
100	102,00	(1,308 ± 0,028)	0,997	(1,405 ± 0,032)	0,996

\*  $M_{\text{расч}}$  — усредненные молекулярные массы бинарных газовых смесей фреона-134А с воздухом, рассчитанные по отношению (1)

### Исследование зависимости дифференциальной ПАВ-частоты от давления индивидуальных газов и газовых смесей фреона-134А с воздухом в динамическом режиме напуска

Ход кинетических кривых изменений диффПАВ-частоты от времени напуска фреоно-воздушных смесей показывает, что в момент попадания фреоно-воздушной смеси на поверхность ПАВ-элемента вместо потока чистого воздуха происходит резкий скачок частоты с последующим выходом на постоянное значение (рис. 4). В общем картина напоминает аналогичную картину, которая наблюдалась для ПАВ-датчика в конструкции одинарной ЛЗ [6]. Однако сравнение кратковременных шумов ПАВ-датчиков показывает, что их уровень в ПАВ-датчике в конструкции двойной ЛЗ, составляющий 0,2...0,3 Гц, ровно на порядок меньше, чем в ПАВ-датчике в конструкции одинарной ЛЗ. Исходя из соотношения сигнал/шум, можно предположить, что чувствительность ПАВ-датчика в конструкции двойной ЛЗ будет на порядок выше таковой для ПАВ-датчика в конструкции одинарной ЛЗ.

Поскольку в эксперименте наблюдался очень быстрый отклик ПАВ-сенсора, представляло практический интерес получить зависимость первой производной отклика от содержания фреона в воздушном потоке. Зависимость первой производной отклика ПАВ-датчика за время  $t = 5$  с от содержания фреона в воздушном потоке описывается квадратичной функцией:  $d\Delta F/dt = (0,03717 \pm \pm 0,00071)(C_{\% \text{ фреона}})^2 + (3,5 \pm 3,1)$  с высоким коэффициентом корреляции  $R = 0,999$  (рис. 5). Коэффициент  $(0,03717 \pm 0,00071)$  данного уравнения, полученного для ПАВ-датчика в конструкции двойной ЛЗ, с точностью до ошибки определения совпадает с таковым, полученным ранее для ПАВ-датчика в конструкции одинарной ЛЗ:  $(0,0356 \pm 0,0001)$  [6], т. е. скорости нарастания отклика ПАВ-датчика для одинарной и двойной ЛЗ одинаковые.

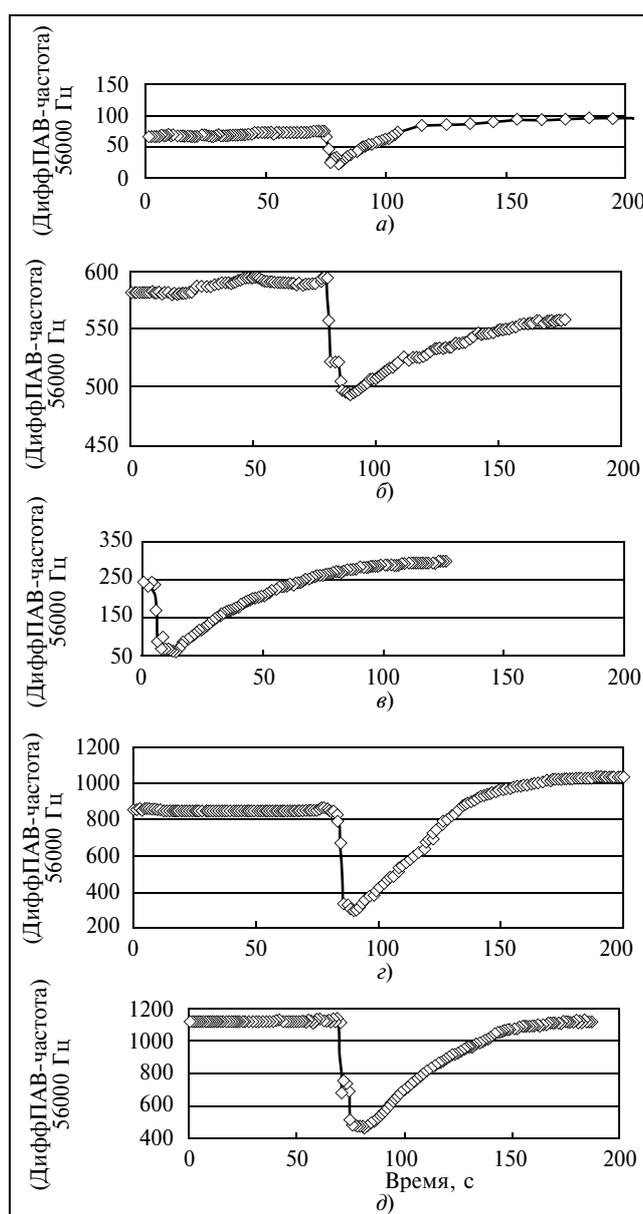


Рис. 4. Зависимости диффПАВ-частоты от времени напуска фреоно-воздушных смесей в газодинамическом режиме при содержании фреона в смеси:

а — 20 %; б — 33 %; в — 40 %; г — 80 %; д — 100 %

Зависимость величины максимального отклика ПАВ-датчика от содержания фреона в воздушном потоке хорошо описывается степенной функцией с дробной степенью:  $\Delta F = (1,41 \pm 0,33) \times (C_{\% \text{ фреона}})^{(1,664 \pm 0,089)}$  с коэффициентом корреляции  $R = 0,996$  (см. рис. 5). Линейная функция:  $\Delta F = (7,11 \pm 0,69)C_{\% \text{ фреона}} - (73 \pm 39)$  дает гораздо худший коэффициент корреляции  $R = 0,98$ . Тем не менее, величина чувствительности ПАВ-датчика в конструкции двойной ЛЗ:  $(7,11 \pm 0,69)$  Гц/% фреона оказалось почти в два раза выше таковой, полученной для ПАВ-датчика в конструкции одинарной ЛЗ:  $(4,02 \pm 0,08)$  Гц/% фреона [6].

Если из корреляции исключить начальную точку с координатами (0,0), т. е. по существу, область относительно малых содержаний фреона в потоке воздуха, то получится линейная функция  $\Delta F = (7,99 \pm 0,50)C_{\% \text{ фреона}} - (136 \pm 31)$ , которая также имеет хороший коэффициент корреляции  $R = 0,995$ . Однако, свободный член линейного уравнения имеет отрицательное значение, что не имеет физического смысла. По всей видимости, зависимость изменений диффПАВ-частоты от содержания фреона в воздушном потоке в области относительно больших содержаний хорошо описывается линейной функцией, а в области относительно малых содержаний фреона — зависимость может носить более сложный характер. Поэтому далее была получена зависимость диффПАВ-частоты от содержания фреона в воздушном потоке в области малых его содержаний — от 0 до 10 %.

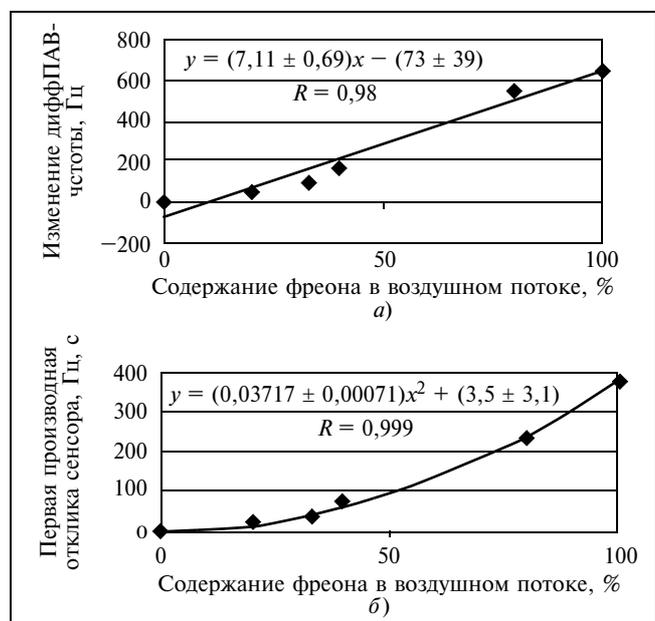


Рис. 5. Зависимости параметров аналитического отклика ПАВ-датчика от содержания (в %) фреона в потоке воздуха: а — величина отклика, Гц; б — величина первой производной отклика, Гц/с

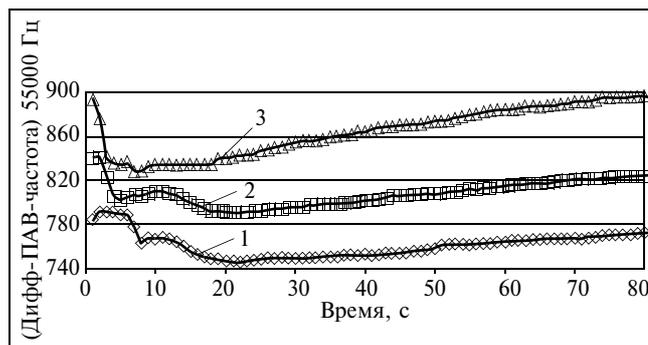


Рис. 6. Кинетические зависимости диффПАВ-частоты от содержания фреона в воздушном потоке: 1 — 2,5 %; 2 — 5,0 %; 3 — 7,7 %

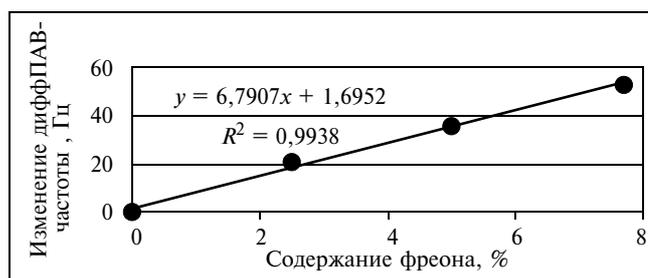


Рис. 7. Зависимость изменений диффПАВ-частоты за первые три секунды после момента попадания фреоно-воздушной смеси на поверхность ПАВ-датчика вместо потока чистого воздуха от содержания фреона в воздушном потоке (в %)

На кинетических кривых изменений диффПАВ-частоты, полученных в потоках воздуха, содержащего относительно малые концентрации фреона, также, как и в случае относительно больших концентраций, наблюдается закономерный рост отклика сенсора с увеличением содержания фреона в воздушном потоке (рис. 6). Из данных видно, что основное изменение диффПАВ-частоты после момента попадания фреоно-воздушной смеси на поверхность ПАВ-элемента вместо потока чистого воздуха происходит за 3 с. Зависимость изменений диффПАВ-частоты за три секунды от процентного содержания фреона в воздушном потоке хорошо описывается линейной функцией:  $\Delta F = (6,79 \pm 0,38)C_{\% \text{ фреона}} + (1,7 \pm 1,8)$  с высоким коэффициентом корреляции  $R = 0,997$  (рис. 7).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на ПАВ-датчике в конструкции “двойная линия задержки на ПАВ без чувствительного покрытия” в присутствии различных бинарных газовых смесей в вакууме и в газодинамическом режиме были проведены исследования эффекта газовой нагрузки. Были получены зависимости изменений диффПАВ-частоты от давле-

ния в вакууме азота, кислорода, аргона, оксида углерода, диоксида углерода и их бинарных смесей; из которых были рассчитаны величины ПАВ-сенсорной чувствительности  $A_f$  для индивидуальных газов и бинарных газовых смесей. Сравнение величин  $A_f$  газовых смесей, полученных из экспериментальных данных, с рассчитанными из величин  $A_f$  для индивидуальных газов по соотношению (1) показало их хорошую сходимость, что указывает на выполнение правила аддитивности величин ПАВ-сенсорной чувствительности  $A_f$  для этих газов.

На практически важной смеси фреона-134А с воздухом были проведены более подробные исследования эффекта газовой нагрузки в вакууме, что позволило построить фазовую диаграмму в координатах: [величина ПАВ-сенсорной чувствительности  $A_f$ ] — [% фреона-134А в смеси]. Было установлено, что она описывается линейной функцией с высоким коэффициентом корреляции, что позволяет использовать ее в количественном анализе смеси фреона-134А с воздухом в вакууме.

Был установлен очень важный с практической точки зрения, а именно использования ПАВ-датчика в конструкции двойной ЛЗ в качестве анализатора бинарных газовых смесей, факт, что анализ бинарных газовых смесей можно вести как на паре ПАВ-элементов, образующих двойную ЛЗ с линейной зависимостью диффПАВ-частоты от давления газов и газовых смесей в вакууме, так и на паре ПАВ-элементов, образующих ПАВ-датчик с зависимостью диффПАВ-частоты от давления газов и газовых смесей, имеющей экстремум.

Для смесей фреона-134А с воздухом из экспериментальных данных, полученных в газодинамических условиях напуска газов и газовых смесей, была получена зависимость величины максимального отклика ПАВ-датчика от процентного содержания фреона-134А в потоке воздуха, которая, как оказалось, наилучшим образом описывается степенной функцией с дробной степенью. Тем не менее, величина чувствительности ПАВ-датчика в конструкции двойной ЛЗ:  $(7,11 \pm 0,69)$  Гц/% фреона практически в два раза выше таковой, полученной для ПАВ-датчика в конструкции одинарной ЛЗ:  $(4,02 \pm 0,08)$  Гц/% фреона [6]. Было установлено, что зависимость первой производной отклика ПАВ-датчика за время  $t = 5$  с от содержания фреона в воздушном потоке описывается квадратичной функцией с высоким коэффициентом корреляции. Кроме этого, было показано, что в области относительно малых содержаний фреона-134А в воздушном потоке (менее 10 %) зависимость величины максимального отклика ПАВ-датчика от процентного содержания фреона

в воздушном потоке описывается линейной функцией с высоким коэффициентом корреляции.

Таким образом, на наш взгляд, ПАВ-датчик в конструкции “двойная ЛЗ без чувствительного покрытия” имеет перспективы практического применения в разработках портативных газоанализаторов бинарных газовых смесей, в том числе направленных на анализ одного из важнейших современных хладагентов — фреона-134А в вакууме и в воздухе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соборовер Э. И., Бессонов С. Г., Абашкин А. Ю., Орлов Е. С. Элемент на поверхностно-акустических волнах без чувствительного покрытия как анализатор газов и газовых смесей. Результаты, полученные на двойной линии задержки для индивидуальных газов и воздуха // Датчики и системы. — 2010. — № 4. — С. 2—7.
2. Соборовер Э. И., Зяблов В. Л. Элемент на поверхностно-акустических волнах без чувствительного покрытия как анализатор газов и газовых смесей. Ч. 2. Бинарные и псевдобинарные газовые смеси // Датчики и системы. — 2005. — № 2. — С. 14—19.
3. Соборовер Э. И., Зяблов В. Л. Элемент на поверхностно-акустических волнах без чувствительного покрытия как анализатор газов и газовых смесей. Ч. 1. Индивидуальные газы и воздух // Датчики и системы. — 2005. — № 1. — С. 32—39.
4. Соборовер Э. И., Абашкин А. Ю., Бессонов С. Г. Элемент на поверхностно-акустических волнах без чувствительного покрытия как анализатор газов и газовых смесей. Ч. 6. Сенсорный датчик для течеискателя фреона-134А. Результаты, полученные на двойной линии задержки // Датчики и системы. — 2006. — № 4. — С. 18—23.
5. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. Ч. 2. Нелинейные системы, преобразование случайных процессов в линейных и нелинейных системах. Борьба с помехами. — М.: Советское радио, 1967. — 327 с.
6. Соборовер Э. И., Бессонов С. Г., Абашкин А. Ю., Прусакова И. И. Элемент на поверхностно-акустических волнах без чувствительного покрытия как анализатор газов и газовых смесей. Ч. 5. Сенсорный датчик для течеискателя фреона-134А. Результаты, полученные на одинарной линии задержки // Датчики и системы. — 2005. — № 11. — С. 37—43.

Эдуард Иосифович Соборовер — канд. хим. наук, ст. научн. сотрудник лаборатории спектроскопии НИИ химии ГОУ ВПО “Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского”;

☎ (831) 465-73-14

E-mail: sobor@ichem.unn.ru

Сергей Геннадьевич Бессонов — канд. техн. наук, директор ООО “Элсис”;

E-mail: aceler@gmail.com

Алексей Юрьевич Абашкин — дипломированный физик, мл. научн. сотрудник ООО “Сенсор НН”;

E-mail: abashckin@mail.ru

Егор Сергеевич Орлов — дипломированный физик, мл. научн. сотрудник ООО “Сенсор НН”;

E-mail: eo@unss.ru

□