

## Об уточнении характеристик изотопных фильтров для квантовых стандартов частоты на рубидиевой газовой ячейке традиционного типа

© О. В. Березовская, А. В. Кудрявцева, Г. М. Смирнова, М. В. Хуторщиков

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

Статья посвящена исследованию свойств и характеристик изотопных фильтров, осуществляющих фильтрацию сверхтонких компонент основного состояния в атомах рубидия, находящихся в ячейке поглощения дискриминатора квантового из состава квантового стандарта частоты на рубидиевой газовой ячейке с источником оптической накачки на безэлектродной спектральной лампе. Работа выполнена с целью изучения возможности снижения влияния флуктуаций температуры безэлектродной спектральной лампы на сдвиги резонансной частоты в ячейке поглощения в зависимости от исследуемых свойств изотопного фильтра.

Представлены результаты комплексных исследований эффективности оптической накачки и сдвигов частоты в ячейке поглощения при использовании изотопных фильтров в зависимости от давления аргона в них в диапазоне 100–220 торр и их температуры 82–92°C. На основании изучения полученных данных были сделаны выводы, что минимальное влияние флуктуаций температуры безэлектродной спектральной лампы на сдвиги резонансной частоты ячейки поглощения обеспечивается при использовании фильтра с давлением аргона 150 торр при температуре 82°C.

**Ключевые слова:** квантовый стандарт частоты, источник оптической накачки, безэлектродная спектральная лампа, изотопный фильтр, ячейка поглощения.

*Контакты для связи:* Березовская Ольга Владимировна ([olgaberezovsk@yandex.ru](mailto:olgaberezovsk@yandex.ru)).

**Для цитирования:** Березовская О. В., Кудрявцева А. В., Смирнова Г. М., Хуторщиков М. В. Об уточнении характеристик изотопных фильтров для квантовых стандартов частоты на рубидиевой газовой ячейке традиционного типа // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 68. С. 9–14.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.68.9-14>

## On the Refinement of the Isotopic Filter Characteristics for Quantum Frequency Standards on a Rubidium Gas Cell of the Traditional Type

O. V. Berezovskaya, A. V. Kudryavtseva, G. M. Smirnova, M. V. Khutorschicov

The Russian Institute of Radionavigation and Time, Saint Petersburg, Russia

### Abstract

The paper is devoted to the study of the properties and characteristics of isotope filters that filter ultrathin components of the ground state in rubidium atoms located in the absorption cell of a physics package from the composition of a quantum frequency standard on a rubidium gas cell with an optical pumping source on an electrodeless spectral lamp, in order to study the possibility of reducing the effect of temperature fluctuations of an electrodeless spectral lamp on shifts of the resonant frequency in the cell absorption depending on the studied properties of the isotope filter.

The results are given of the complex studies of the optical pumping and frequency shifts efficiency in the absorption cell using isotope filters depending on the argon pressure in them in the range of 100–220 torr and their temperature 82–92°C. Based on the study of the data obtained, it was concluded that the minimal effect of temperature fluctuations of an electrodeless spectral lamp on the shifts of the absorption cell resonance frequency is provided when using a filter with a pressure of 150 torr of argon at a temperature of 82°C.

**Keywords:** quantum frequency standard, optical pumping source, electrodeless spectral lamp, isotope filter, absorption cell.

*Contacts:* Olga V. Berezovskaya ([olgaberezovsk@yandex.ru](mailto:olgaberezovsk@yandex.ru)).

**For citation:** Berezovskaya O. V., Kudryavtseva A. V., Smirnova G. M., Khutorschicov M. V. On the refinement of the isotopic filter characteristics for quantum frequency standards on a rubidium gas cell of the traditional type // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 68. P. 9–14.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.68.9-14>

Несмотря на развитие новых стандартов частоты с использованием лазерных технологий, в настоящее время квантовые стандарты частоты на рубидиевой газовой ячейке (КСЧ РГЯ) с источником линейчатого спектра на безэлектродной спектральной лампе (БЭСЛ) широко используются в различных радионавигационных комплексах и глобальных навигационных системах благодаря своим достаточно высоким точностным характеристикам, дешевизне и малыми габаритами. Требования к стандартам частоты в части точностных и эксплуатационных характеристик со стороны разработчиков новых систем непрерывно растут, а это требует повышения характеристик входящих в них узлов.

Одним из основных узлов КСЧ РГЯ является дискриминатор квантовый (ДК), в котором методом оптической накачки (ОН) создается инверсия населенности сверхтонкого перехода основного состояния  $5\ ^2S_{1/2}\ F=2-5\ ^2S_{1/2}\ F=1$  в атомах рубидия, находящихся в ячейке поглощения, по частоте которого происходит подстройка частоты кварцевого генератора в КСЧ РГЯ.

Как известно (Пихтелев и др., 1978, Риле, 2009), для создания инверсной населенности на

газовую ячейку с  $Rb^{87}$  надо воздействовать светом со спектральными компонентами  $D_1F_1$  и  $D_2F_1$ . Структура энергетических уровней атомов рубидия представлена на рис. 1.

Для этого излучение изотопа  $Rb^{87}$  от БЭСЛ пропускают через изотопный фильтр, так называемую ячейку-фильтр (ЯФ), содержащую изотоп  $Rb^{85}$ . Т. к. энергии верхних подуровней сверхтонкой структуры основного состояния у  $Rb^{85}$  и  $Rb^{87}$  почти совпадают (разница 1300 МГц, см. рис. 1), происходит поглощение компонент  $D_1F_2$  и  $D_2F_2$ , и проходящий свет практически не будет содержать этих компонент. Для повышения эффективности фильтрации в ЯФ вводят буферный газ, позволяющий уменьшить разницу между частотами переходов. Сдвиг энергетических уровней  $Rb^{85}$  зависит от величины давления буферного газа в ячейке-фильтре и от его температуры.

Условия изотопной фильтрации (давление буферного газа в ЯФ и его температура) определяют величину сдвига резонансной частоты в ячейке поглощения при изменении характеристик излучения БЭСЛ.

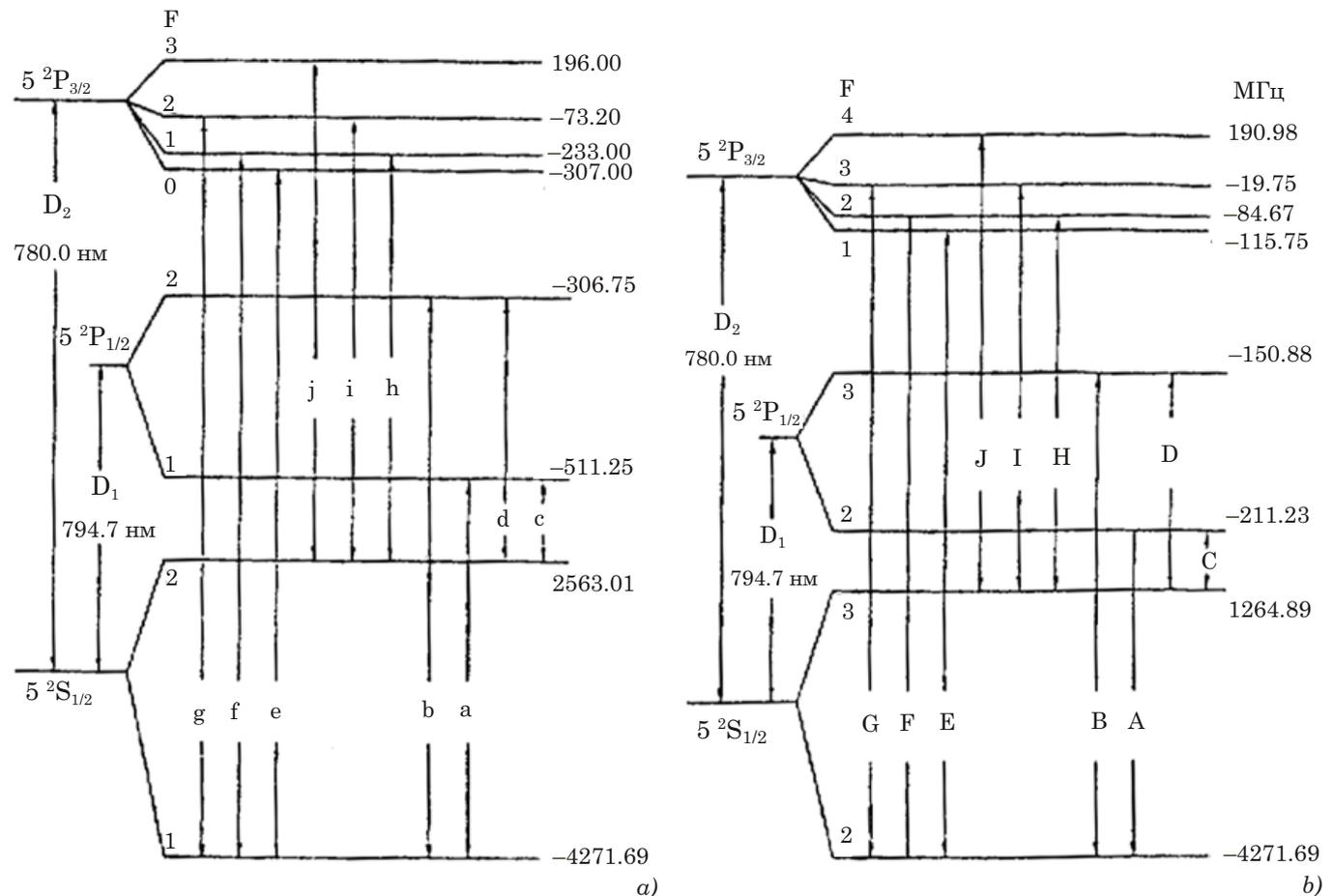
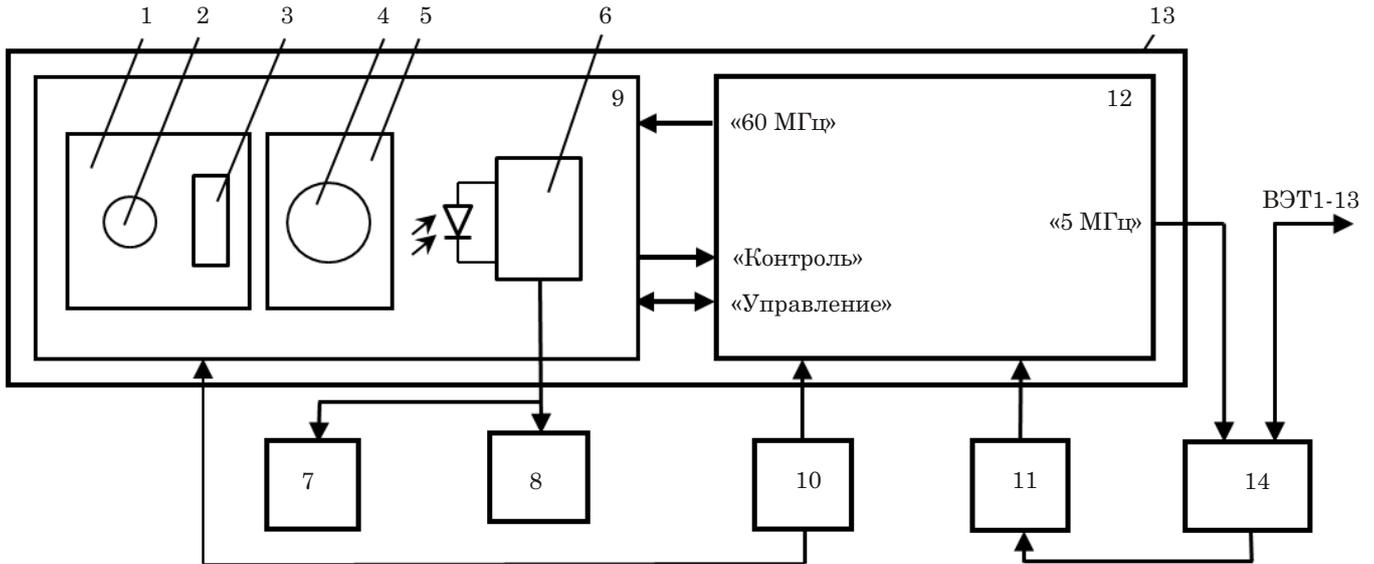


Рис. 1. Энергетический спектр атомов рубидия: а) для изотопа  $Rb^{87}$ ; б) для изотопа  $Rb^{85}$



1 – источник оптической накачки; 2 – БЭСЛ из состава технологического ДК; 3 – исследуемая ЯФ; 4 – ячейка поглощения из состава технологического ДК; 5 – резонатор; 6 – согласующий усилитель; 7 – осциллограф электронно-лучевой GOS-622G; 8 – микровольтметр селективный В6-9; 9 – технологический ДК; 10 – источник питания постоянного тока, регулируемый GPS-4303; 11 – ПЭВМ типа IBM-PC; 12 – устройство стандарта частоты УСЧ; 13 – технологический КСЧ РГЯ; 14 – компаратор частотный ЧК7-1012; ВЭТ1-13 – вторичный эталон единиц времени и частоты ВЭТ1-13

Рис. 2. Блок-схема лабораторной установки

В рамках данной работы были проведены исследования свойств и характеристик изотопных фильтров от указанных параметров с целью изучения возможности обеспечения снижения влияния флуктуаций температуры БЭСЛ на сдвиги резонансной частоты в ячейке поглощения в зависимости от исследуемых свойств изотопного фильтра.

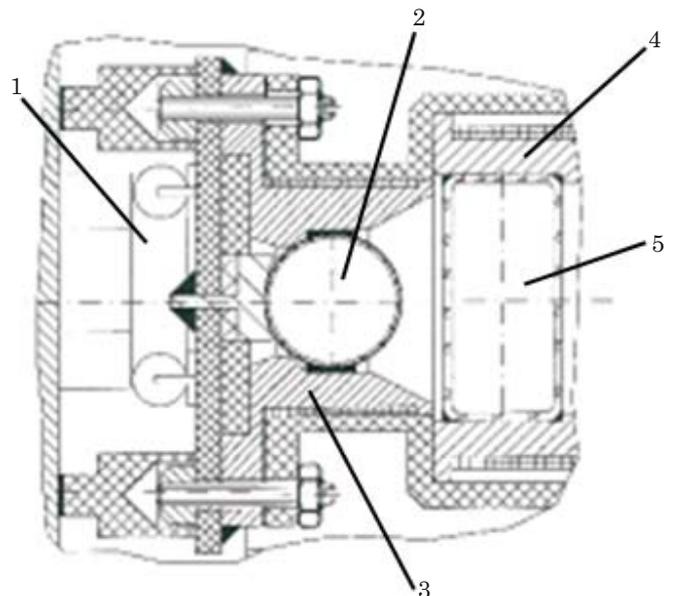
Исследования проводились на лабораторной установке, представляющей собой технологический КСЧ РГЯ с ДК, позволяющим оперативно менять ЯФ. Блок-схема установки приведена на рис. 2.

Относительное изменение частоты ( $\Delta f/f_0$ ) кварцевого генератора КСЧ РГЯ при работе определялось с помощью частотного компаратора относительно вторичного эталона единиц времени и частоты ВЭТ1-13 и регистрировалось с помощью ПЭВМ. Т.к. связь изменения частоты кварцевого генератора с изменением резонансной частоты ( $f_{рез}$ ) в рубидиевой ячейке линейна и определяется выражением:  $\delta(\Delta f/f_0) = \delta f_{рез}/6.834 \cdot 10^9$ , в дальнейшем будем рассматривать именно относительное изменение частоты кварцевого генератора — ( $\Delta f/f_0$ ).

ЯФ размещается в термостате, входящем в состав источника ОН, который состоит из высококачественного генератора, возбуждающего разряд в БЭСЛ, и термостата с ЯФ, осуществляющего фильтрацию одной из сверхтонких компонент в излучении БЭСЛ.

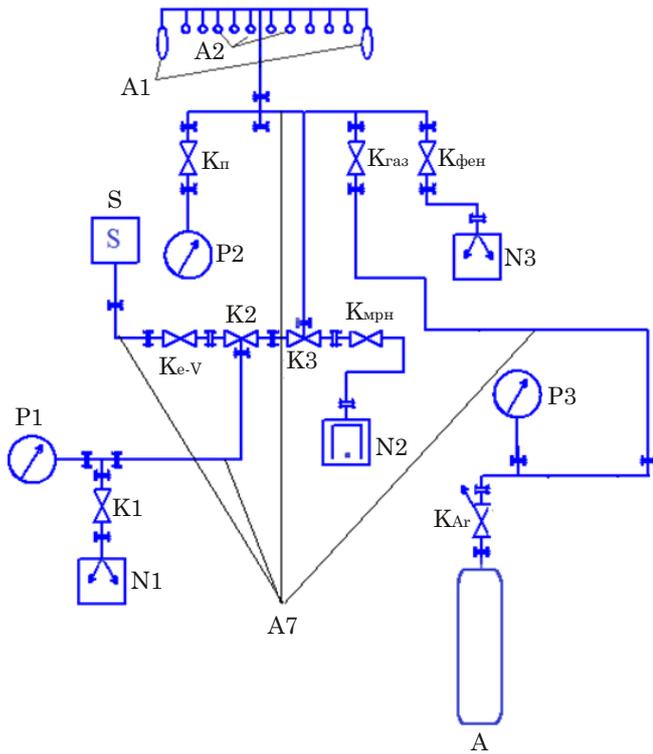
Конструкция источника ОН приведена на рис. 3.

В качестве объекта исследования были выбраны ЯФ, наполненные парами рубидия  $Rb^{85}$  и буферным газом аргоном Ar. Фильтр представлял собой стеклянный цилиндрический баллон, изготовленный из стекла марки С51-1, диаметром 14 мм, длиной 7 мм. Заготовки размещались на вакуумно-откачном посту, схема которого приведена на рис. 4.



1 – ВЧ-генератор; 2 – БЭСЛ; 3 – термостат БЭСЛ; 4 – термостат ЯФ; 5 – ЯФ

Рис. 3. Конструкция источника оптической накачки



A1 – ампулы с изотопом Rb<sup>85</sup>;  
 A2 – откачиваемые заготовки ЯФ;  
 А – баллон со спектрально чистым Ar;  
 A7 – прогреваемый вакуумный трубопровод;  
 K1, K2, K3, Kп, Kе-в, Kфвн, Kгаз, Kмрн – прогреваемые вакуумные краны;  
 KAr – прогреваемый натекагель;  
 P1, P2 – датчики Пирани;  
 P3 – датчик Баратрон; N1 – откачной пост;  
 N2 – магниторазрядный насос;  
 N3 – форвакуумный насос; S – масс-спектрометр

Рис. 4. Схема вакуумно-откачного поста

Затем производился полный цикл изготовления (вакуум-термическое обезгаживание, дистилляция металла, наполнение буферным газом, отпайка и тренировка). Для исследований была изготовлена серия ЯФ, наполненных аргоном при разных давлениях.

Основной характеристикой фильтра является коэффициент эффективности ОН ( $K_{он}$ ), характеризующий увеличение сигнала радиооптического резонанса при установке в оптический тракт ДК изотопного фильтра.  $K_{он}$  определяется по формуле

$$K_{он} = \frac{U_c}{U_{co}}, \quad (1)$$

где  $U_c$  и  $U_{co}$  — амплитуды первой гармоники сигнала ошибки, измеренного на выходе согласующего усилителя с фильтром и без него соответственно.

С помощью установки, приведенной на рис. 2, были сняты зависимости относительного изменения частоты ДК и  $K_{он}$  от температуры БЭСЛ при разных давлениях Ar в ЯФ и разных температурах термостата ЯФ. Температурный диапазон БЭСЛ и ЯФ для исследования выбирался исходя из опыта работы с реальными конструкциями ДК. Полученные результаты приведены на рис. 5.

Из анализа полученных зависимостей следует, что максимальная эффективность ОН для БЭСЛ наблюдается в диапазоне  $T_{сл} \sim (106-108)^\circ\text{C}$ . В табл. 1 представлены сводные данные по обработке экспериментальных графиков в окрестности температуры БЭСЛ, равной  $106^\circ\text{C}$  (минимальная рабочая температура из диапазона выбирается для повышения ресурса БЭСЛ).

В этой же таблице приведены значения параметра качества  $F$ , который является характеристикой ДК и определяется по формуле

$$F = \frac{U_c}{U_{ш} \cdot \Delta f}, \quad (2)$$

где  $U_c$  — амплитуда первой гармоники сигнала ошибки, мВ, определялась при расчете  $K_{он}$  по (1);  $U_{ш}$  — среднеквадратическое напряжение шума в полосе 0.25 Гц;  $\Delta f$  — полуширина спектральной линии, Гц.

Значения  $F$ , приведенные в табл. 1, рассчитаны при среднем значении измеренного  $U_{ш} = 290$  мкВ,  $\Delta f = 500$  Гц.

Таблица

Зависимость сдвигов резонансной частоты ( $\Delta(\Delta f/f_0)$ ) и параметра качества ( $F$ ) от наполнения и температуры ЯФ

$T_{яф}, ^\circ\text{C}$	82			84			90			92		
$P_{яф}, \text{торр}$	$\Delta(\Delta f/f_0)$ при $\Delta T_{сл} = 105-107^\circ\text{C}, \times 10^{-10}$	$K_{он}$	$F, \text{Гц}^{-1}$	$\Delta(\Delta f/f_0)$ при $\Delta T_{сл} = 105-107^\circ\text{C}, \times 10^{-10}$	$K_{он}$	$F, \text{Гц}^{-1}$	$\Delta(\Delta f/f_0)$ при $\Delta T_{сл} = 105-107^\circ\text{C}, \times 10^{-10}$	$K_{он}$	$F, \text{Гц}^{-1}$	$\Delta(\Delta f/f_0)$ при $\Delta T_{сл} = 105-107^\circ\text{C}, \times 10^{-10}$	$K_{он}$	$F, \text{Гц}^{-1}$
100	-0.96	52.8	16.7	-1.32	58.2	18.4	-1.62	67	21.2	-1.77	67.0	21.2
150	0.01	51.7	16.3	-0.16	53.8	17.0	-0.8	61.1	19.3	-0.87	61.9	19.6
180	0.30	49.7	15.7	0.09	53.5	16.8	-0.55	60	19.0	-0.84	59.3	18.8
220	1.07	42.6	13.5	0.92	46.0	14.5	0.18	51.9	16.4	-0.10	49.0	15.5

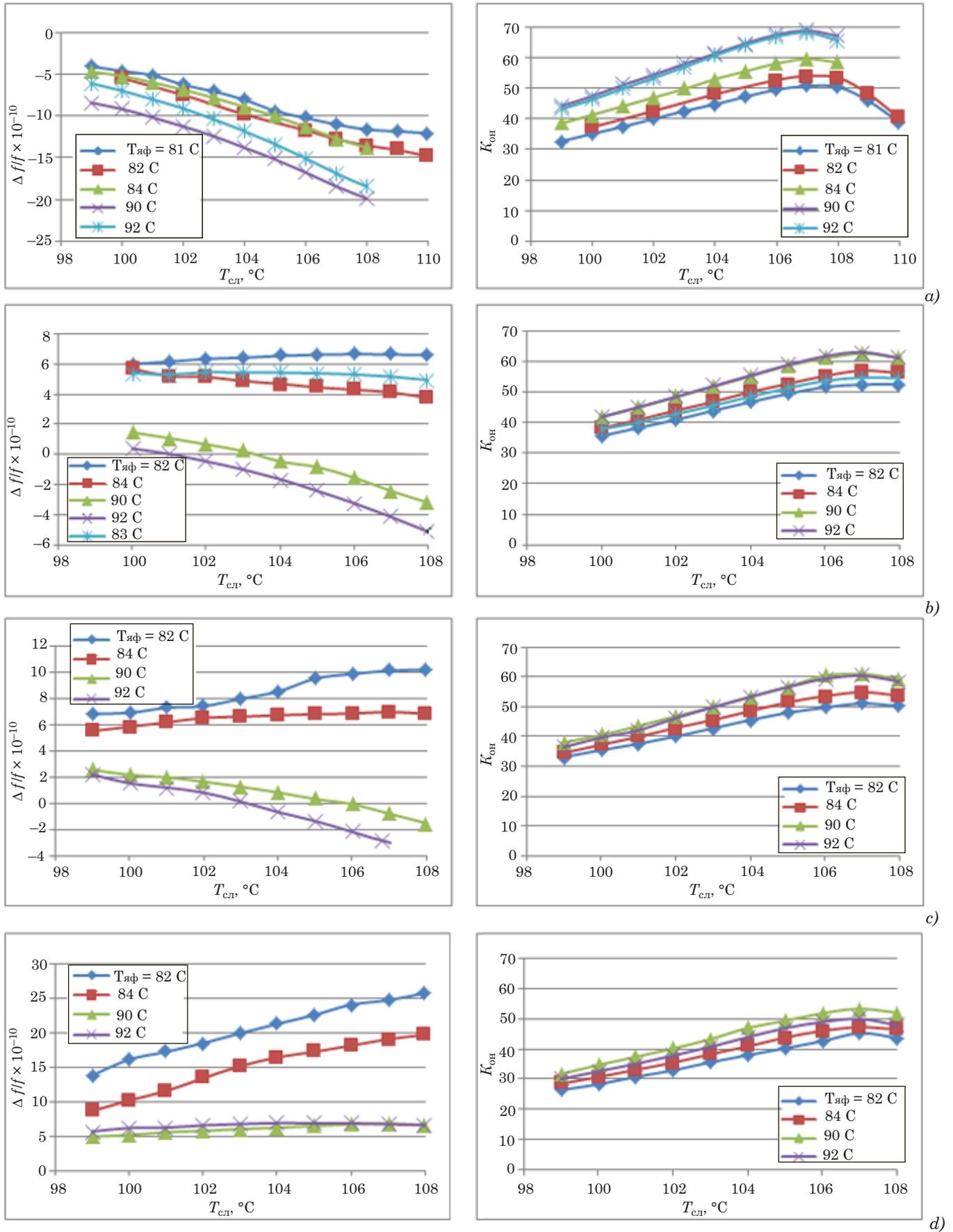


Рис. 5. Зависимости относительного изменения частоты ( $\Delta f/f_0$ ) и  $K_{ОН}$  от температуры БЭСЛ ( $T_{сл}$ ) при разных температурах и давлениях ( $P$ ) Ar в ЯФ: а)  $P_{Ar} = 100$  торр; б)  $P_{Ar} = 150$  торр; в)  $P_{Ar} = 180$  торр; д)  $P_{Ar} = 220$  торр

Изучив данные таблицы, можно сделать вывод, что минимальное влияние флуктуаций температуры БЭСЛ на сдвиги резонансной частоты ( $\Delta(\Delta f/f_0) \sim 10^{-12} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  (выделено цветом) обеспечивается при использовании ЯФ с давлением 150 торр Ar при температуре 82°C. При этом параметр качества ДК составляет величину 16.3 Гц<sup>-1</sup>, что значительно (минимум в 3 раза) превышает  $F$  у серийно изготавливаемых приборов. Учитывая, что в ДК предусмотрено поддержание температуры термостатов с точностью (0.1–0.01)°C, можно утверждать, что температурная чувствительность ДК будет на уровне ( $1 \cdot 10^{-13}$ – $5 \cdot 10^{-14}$ ) 1/°C.

Таким образом, проведенные в работе исследования позволили выбрать наполнение и режим

функционирования изотопного фильтра, минимизирующий влияние температурных флуктуаций БЭСЛ на сдвиги резонансной частоты, тем самым понизив температурную чувствительность дискриминатора и обеспечив при этом параметр качества его более 15 Гц<sup>-1</sup>.

## Литература

*Пихтелев А. И., Ульянов А. А., Фатеев Б. П. и др. /* Под ред. Фатеева Б. П. Стандарты частоты и времени на основе квантовых генераторов и дискриминаторов. М.: Сов. Радио, 1978. 304 с.

*Риле Ф.* Стандарты частоты. Принципы и приложения / пер. с англ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 512 с.