

МИНИСТЕРСТВО УКРАИНЫ ПО ВОПРОСАМ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ И ПО  
ДЕЛАМ ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ ОТ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ КАТАСТРОФЫ  
АКАДЕМИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УКРАИНЫ

# ПРОБЛЕМЫ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Выпуск 13

Зарегистрирован Государственным комитетом информационной политики  
29 августа 2002 года Серия КВ № 6467

Утверждено к печати ученым советом  
АПБ Украины  
(протокол № 15 от 26.05.2003 г.)

Харьков  
"Фолио" 2003

УДК 355.588+614.8+621.3

Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Фолио, 2003. – Вып. 13. – 172 с.

Издание основано в 1997 году. Включено в перечень изданий ВАК Украины (приказ № 1-03/8 от 11.10.2000 г.).

Представлены результаты научных исследований в области пожарной безопасности. Рассматриваются организационно-технические аспекты совершенствования пожарной безопасности, отражающие современные методы повышения эффективности противопожарной защиты и тенденции развития научных исследований в данной области.

Материалы предназначены для инженерно-технических работников пожарной охраны, профессорско-преподавательского состава, адъюнктов, слушателей и курсантов пожарнотехнических учебных заведений.

Ил.– 42, табл.– 18.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:** д-р техн. наук, проф. *Ю.А. Абрамов* (отв. ред.), д-р техн. наук, проф. *О.П. Алексеев*, д-р техн. наук, доц. *А.С. Белikov*, д-р техн. наук, проф. *Е.В. Бодянский*, д-р техн. наук, проф. *Н.И. Иванov*, д-р техн. наук, доц. *В.М. Комяк*, д-р техн. наук, ст. науч. сотр. *В.И. Кривцова*, д-р техн. наук, проф. *Л.Н. Куценко*, д-р техн. наук, доц. *А.Н. Ларин*, д-р физ.-мат. наук, проф. *В.П. Ольшанский*, д-р техн. наук, проф. *Э.Е. Прохач*, д-р физ.-мат. наук, проф. *В.Б. Рабухин*, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. *А.П. Созтик*, д-р физ.-мат. наук, проф. *С.В. Яковлев*.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. *О.Н. Фоменко*,  
д-р техн. наук, проф. *О.Г. Руденко*.

Видання засноване у 1997 році. Включене до переліку видань ВАК України (наказ № 1-03/8 від 11.10.2000 р.).

Наведені результати наукових досліджень у галузі пожежної безпеки. Розглядаються організаційно-технічні аспекти вдосконалення пожежної безпеки, що відображають сучасні методи підвищення ефективності протипожежного захисту та тенденції розвитку наукових досліджень в даній галузі.

Матеріали призначені для інженерно-технічних робітників пожежної охорони, професорсько-викладацького складу, ад'юнктів, слухачів та курсантів пожежно-технічних навчальних закладів.

*В.В. Тригуб, адъюнкт, АПБУ,  
В.П. Ольшанский, д-р. физ.-мат. наук, нач. кафедры, АПБУ*

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ОЧАГА ПРИ ГНЕЗДОВОМ САМОНАГРЕВАНИИ СЫРЬЯ**

Разработан и апробирован алгоритм поиска параметров локализованного очага по результатам измерения температуры в отдельный момент времени в различных точках массива. В ходе расчетов также определяется месторасположение центра очага.

**Постановка проблемы.** В последние десятилетия решения обратных задач теплопроводности привлекали многих исследователей. Исследования проводились при проектировании теплозащиты аэрокосмической техники, оптимального конструирования турбин и двигателей внутреннего сгорания, процессов термообработки и литья [1-4].

**Анализ последних достижений и публикаций.** В настоящее время задачи идентификации получили свое применение при прогнозировании пожарной опасности процесса самонагрева растительного сырья в хранилищах. Так в работах [5-7] определение параметров очага по результатам замеров температуры построено на замкнутых аналитических решениях обратной задачи теплопроводности. Одним из недостатков данного метода является то, что эти решения можно получить лишь для простейших случаев самонагрева, т.е. исследуемый процесс самонагрева должен строго следовать тем предположениям, которые принимались при построении расчетных формул. И в случае существенного отклонения, обратные решения, как некорректные, могут оказаться вне области их определения и стать непригодными для расчетов. В работах [8-9] идентификация параметров очага проводилась при помощи номограмм. Недостатком обоих этих методов является то, что для проведения идентификации требуется точная информация о времени зарождения очага и о месторасположении центра очага, которых обычно нет, и ее получение с помощью измерений является непростой задачей. Поэтому в работах [10-12] предлагался приближенный метод идентификации параметров очага, использующий дискретное множество решений прямых задач. Он обладает универсальностью и лишен, указанных выше, недостатков. Однако из-за большого объема вычислений реализация его возможна только с применением персонального компьютера. В основе данного метода лежат специальный алгоритм и решение прямой задачи теплопроводности. Причем в работах [10,11] дан-

ный метод применялся при стационарном самонагревании пластическим очагом, а в работе [12] при нестационарном самонагревании для пластического, стержневого и гнездового очагов при распределении плотности термоисточников по закону Гаусса.

**Постановка задачи и ее решение.** Здесь ставится и решается задача реконструирования нестационарного температурного поля самонагревания растительного сырья с целью повышения пожарной безопасности объекта хранения. Наличие системы термоконтроля не дает полной информации о температурном поле, так как она поступает только с отдельных точек массива. Могут оставаться неизвестными максимальные температуры сырья и места их локализации, особенно когда они находятся вдали от термопар. Поэтому для получения полной информации о распределении температуры в массиве сырья приходится решать задачу реконструкции, т.е. построение модели температурного поля, на основании данных о температуре в отдельных точках массива.

К неизвестным относятся параметры  $\xi$ ,  $\gamma$ ,  $q_0$ . Здесь  $\xi$  – расстояние от первой термопары до центра очага,  $\gamma$  – радиус очага,  $q_0$  – плотность термоисточников в очаге. Ставится задача их определения по известным избыточным температурам  $T_i = T(r_i, t)$  в отдельных поперечных сечениях  $r_i = r_0 + i \Delta r$ ,  $i \in [0; (K-1)]$ . Для ее решения воспользуемся рядом ускоренной сходимости, построенным в работе [13]. Он имеет вид

$$T(r, t) = q_0 f(r, \gamma, t), \quad (1)$$

$$f(r, \gamma, t) = \frac{1}{\lambda} \left[ S(r) - \frac{2R^2}{\pi^3 r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} e^{-a \left( \frac{n\pi}{R} \right)^2 t} \varphi(\gamma, R) \right] \sin \left( \frac{n\pi r}{R} \right),$$

$$\text{Здесь } S(r) = \frac{\gamma^2}{3} \begin{cases} \left( \frac{3}{2} - \frac{1}{2} \frac{r^2}{\gamma^2} - \frac{\gamma}{R} \right) & \text{при } 0 \leq r \leq \gamma \\ \left( \frac{\gamma}{r} - \frac{\gamma}{R} \right) & \text{при } \gamma \leq r \leq R \end{cases}$$

$$\varphi(\gamma, R) = \frac{R}{\pi n} \sin \left( \frac{n\pi \gamma}{R} \right) - \gamma \cos \left( \frac{n\pi \gamma}{R} \right).$$

$a = \lambda(\rho c)$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности сырья;  $\rho$ ,  $c$  – его плотность и удельная теплоемкость;  $r$  – расстояние от центра очага до расчетной точки;  $t$  – время;  $R$  – радиус внешней сферической поверхности, окаймляющей очаг, на которой принимаем избыточную температуру равной нулю.

Приближенное решение обратной задачи теплопроводности

будем проводить последовательным сужением доверительных интервалов. Алгоритм включает в себя следующие действия:

1. Выполняется переход от замеренных температур к их отношениям  $\bar{T}_i = T_i T_0^{-1}$ .

2. задается доверительный интервал  $\xi \in (\xi_n, \xi_k)$ , делится на  $M$  отрезков и во внешнем цикле по  $m$  от 0 до  $M$  вычисляются  $\xi_m = \xi_n + m(\xi_k - \xi_n)M^{-1}$ .

3. задается доверительный интервал  $\gamma \in (\gamma_n, \gamma_k)$ , делится на  $N$  отрезков и во внутреннем цикле по  $n$  от 0 до  $N$  вычисляются  $\gamma_n = \gamma_n + n(\gamma_k - \gamma_n)N^{-1}$ .

4. Проводится вычисление значений

$$f_i = f(\xi_m + i\Delta\xi, \gamma_n, t), \quad i = \overline{0; (K-1)}$$

5. Осуществляется переход к отношениям

$$\bar{f}_i = f_i (f_0)^{-1}.$$

6. Вычисляется сумма квадратов отклонений

$$S_{mn} = \sum_{i=0}^{K-1} (\bar{T}_i - \bar{f}_i)^{-1}$$

и выбирается наименьшее ее значение в дискретном двумерном массиве.

7. Фиксирование в качестве приближенного решения задачи тех значений  $\xi_m$  и  $\gamma_n$ , которые дают наименьшую величину  $S_{mn}$ .

8. Делается уточняющий расчет, при необходимости более точного решения задачи идентификации. Он включает выбор более коротких доверительных интервалов в окрестностях прежде найденных значений  $\xi_m$  и  $\gamma_n$ , и повторный пересчет, согласно пунктам: 2, 3, 4, 5, 6, 7.

9. Вычисляется параметр  $q_0$  по формуле

$$q_0 = T_0 (f(\xi_m, \gamma_n, t))^{-1}.$$

10. Делается проверочный расчет. Он состоит в том, что приближенно найденные:  $q_0$ ,  $\xi = \xi_m$  и  $\gamma = \gamma_n$  подставляются в формулу (1) и вычисляются теоретические значения  $T_i = q_0 f(\xi + i\Delta\xi, \gamma, t)$ . Затем они сравниваются с экспериментальными значениями  $T_i$ , которые использовались для проведения идентификации.

Рассмотрим, как работает алгоритм на конкретных примерах.

**Пример 1.** Для апробации данного алгоритма возьмем избыточные температуры из таблицы 1, в которой представлены результаты экспериментальных исследований проведенных в работе [14] на базе отдела № 5 УкрНИИПБ МВД Украины.

Таблица 1 – Зависимость температуры перегрева от координаты для сферического очага тепловыделения (для  $q_0 = 40 \text{ Вт/м}^3$ ;  $\gamma = 0,3 \text{ м}$ ;  $\alpha = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda = 0,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ )

Время проведения эксперимента, сут	Координата $r$ , м	$T_{\Sigma}$ , °С	$T_P$ , °С	$\delta$ , %
5	0,06	7,15	7,15	0
	0,12	6,9	6,71	2,75
	0,18	5,9	5,99	1,53

Возьмем избыточные температуры при  $t=5$  сут.:  $T_0 = 7,15^\circ\text{C}$ ;  $T_1 = 6,9^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 5,9^\circ\text{C}$  с интервалом по координате 0,06 м.

Для проведения идентификации задаем  $\xi_{11} = 0,01 \text{ м}$ ;  $\xi_K = 0,1 \text{ м}$ ;  $M = 100$ ;  $\gamma_n = 0,1 \text{ м}$ ;  $\gamma_K = 0,7 \text{ м}$ ;  $N = 500$ . Выполнив расчет на компьютере, находим:  $\xi = 6,22 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;  $\gamma = 0,296 \text{ м}$ ;  $q_0 = 40,16 \text{ Вт/м}^3$ ;  $S_{\text{min}} = 8,19 \cdot 10^{-4}$ . Ограничиваясь указанным приближением, находим теоретические значения температур. Они составляют:  $T_0 \approx 7,15^\circ\text{C}$ ;  $T_1 \approx 6,71^\circ\text{C}$ ;  $T_2 \approx 5,99^\circ\text{C}$ , что указано в табл. 1.

Подставляя идентифицированные параметры гнездового очага в формулу (1) найдем теоретические значения избыточных температур для 10 и 15 суток. Они представлены на рис. 1. Сравнивая их с экспериментальными результатами, приходим к выводу о приемлемой точности проведенной идентификации параметров гнездового очага.

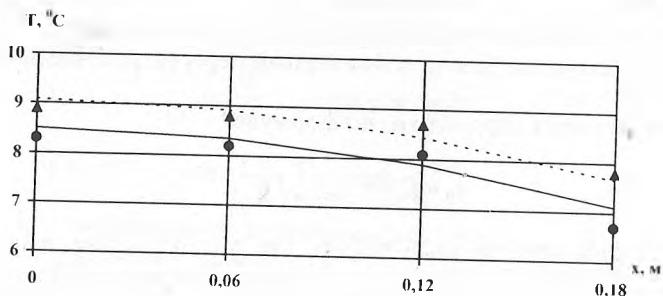


Рисунок 1 – Распределение температурных полей по координате в зерновой насыпи с параметром  $t$  (10 – ●, 15 – ▲) суток при:  $q_0 = 40 \text{ Вт/м}^3$ ;  $\gamma = 0,3 \text{ м}$ ;  $\alpha = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda = 0,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$

**Пример 2.** В предыдущем примере для проведения идентификации было взято три точки, в которых измерялась избыточная температура. Рассмотрим случаи, когда у нас известно меньше точек, например, только две точки, но известно положение центра очага. Апробацию метода проведем, взяв результаты экспериментальных исследований проведенных в работе [15] на базе ВНИИПО МЧС России для травяной муки (при  $q_0 = 120 \text{ Вт/м}^3$ ;  $\gamma = 0,5 \text{ м}$ ;  $\rho c = 8,5 \cdot 10^5 \text{ Дж/(м}^3\text{К)}$ ;  $\lambda = 0,09 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) и представленные в табл. 2.

Таблица 2 – Средние приращения температур, °С

Время t, сутки	Расстояние от центра очага, м	
	0,3	0,6
2	21	6
3	32	10
4	36	12

Проведем идентификацию для  $t = 2$  суток.

Пусть с интервалом по координате 0,3 м для  $t = 2$  суток измерения температур дали:  $T_1 = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для проведения идентификации задаем  $\xi_n = 0,3 \text{ м}$ ;  $\xi_k = 0,3 \text{ м}$ ;  $M = 1$ ;  $\gamma_n = 0,1 \text{ м}$ ;  $\gamma_k = 0,7 \text{ м}$ ;  $N = 100$ . Выполнив расчет, находим:  $\xi = 0,3 \text{ м}$ ;  $\gamma = 0,54 \text{ м}$ ;  $q_0 = 111,39 \text{ Вт/м}^3$ ;  $S_{mn} = 7,5 \cdot 10^{-9}$ ;  $T_1 = 21,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 6,0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Подставим найденные параметры гнездового очага в формулу (1) и найдем значения температур в точках измерений на 3 и 4 сутки. Они обозначены символом  $T_p$  в табл. 3.

Таблица 3 – Приращения избыточных температур, °С

Время t, сутки	Расстояние от центра очага, м					
	0,3			0,6		
	$T_{\xi}$ , °С	$T_p$ , °С	$\delta$ , %	$T_{\xi}$ , °С	$T_p$ , °С	$\delta$ , %
3	32	30	6,25	10	9,4	6
4	36	37	2,7	12	12,5	4,2

Проведем идентификацию для  $t = 3$  сут и  $t = 4$  сут. Измерения температур на  $t = 3$  сут дали:  $T_1 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  [15]. Выполнив идентификацию, получаем:  $\xi = 0,3 \text{ м}$ ;  $\gamma = 0,55 \text{ м}$ ;  $q_0 = 120,89 \text{ Вт/м}^3$ ;  $S_{mn} = 1,34 \cdot 10^{-8}$ ;  $T_1 = 32,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 10,0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Идентификация для температур  $T_1 = 36 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 12 \text{ }^\circ\text{C}$  измеренных на 4-е сутки [15] привела к значениям  $\xi = 0,3 \text{ м}$ ;  $\gamma = 0,47 \text{ м}$ ;  $q_0 = 114,2 \text{ Вт/м}^3$ ;  $S_{mn} = 7,63 \cdot 10^{-10}$ ;  $T_1 = 36,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 11,99 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Усредним полученные параметры идентификации и сравним с экспериментальными. Они представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Средние значения идентифицированных параметров

Идентифицированные параметры	Экспериментальные значения	Расчетные значения	Относительная погрешность, %
$\gamma, \text{ м}$	0,5	0,52	4
$q_0, \text{ Вт/м}^3$	120	115,5	3,75

Полученные результаты с приемлемой точностью приближаются к замеренным, что подтверждает удачное проведение идентификации.

**Выводы.** Таким образом, разработанный алгоритм позволяет с помощью компьютера находить параметры локализованных очагов по результатам измерения температуры в любой точке насыпи при гнездовом самонагревании сырья. Попутно также находится расстояние до центра очага, т.е. его месторасположение.

Перспективным является направления для разработки алгоритма идентификации параметров очага самонагревания при измерении температуры в разных точке и в разных временных интервалах.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
- 2 Бек Джеймс и др. Некорректные обратные задачи теплопроводности твердых тел. – М.: Мир, 1989. – 312 с.
- 3 Мацевитый Ю.М., Мултановский А.В. Идентификация в задачах теплопроводности. – К.: Наукова думка, 1982. – 240 с.
- 4 Мацевитый Ю.М., Лушпенко С.Ф. Идентификация теплофизических свойств твердых тел. – К.: Наукова думка, 1990. – 213 с.
- 5 Ольшанский В.П. Формула для вычисления избыточной температуры пластового самонагревания сырья и другие ее приложения // Пожаровзрывобезопасность, 2000, № 4. – С. 13 – 15.
- 6 Ольшанский В.П. Идентификация параметров стержневого очага при самонагревании сырья // Проблемы пожарной безопасности. Сб.науч.тр. АПБУ. – Вып. 7. – Харьков: Фолио, 2000. – С. 152 – 156.
- 7 Ольшанский В.П. Идентификация параметров гнездового очага при самонагревании сырья // Проблемы пожарной безопасности. Сб.науч.тр. АПБУ. – Вып. 8. – Харьков: Фолио, 2000. – С. 107 – 111.
- 8 Тригуб В.В. Идентификация параметров гнездового очага при самонагревании растительного сырья // Проблемы пожарной безопасности. Сб.науч.тр. АПБУ. – Вып. 10. – Харьков: Фолио, 2001. – С. 187 – 190.
- 9 Тригуб В.В., Грушко А.И. Приближенная методика определения параметров гнездового самонагревания сырья, порожденное сферическим очагом с увеличивающимся радиусом // Проблемы пожарной безопасности. Сб.науч.тр. АПБУ. – Вып. 11. – Харьков: Фолио, 2002. – С. 206 – 208.
- 10 Ольшанский В.П. Идентификация параметров, места локализации и



---

времени возникновения очага при пластовом самонагревании сырья // Научно-техн. Сб.: Коммунальное хозяйство городов. Вып. 38. – К.: Техніка, 2002. – С. 330-333.

11 Криса И.А., Мамон В.П., Ольшанский В.П. Сравнение численного и аналитического решений задачи идентификации при пластовом самонагревании сырья // Науковий вісник будівництва: Харків. – ХДТУБіА. ХОТВАБУ. - №18, 2002. - С. 221 – 225.

12 Ольшанский В.П. Алгоритм компьютерного поиска параметров локализованного очага при самонагревании сырья // Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр. АПБУ. – Вып. 10. – Харьков: Фолио, 2001. – С. 125 – 130.

13 Ольшанский В.П., Тригуб В.В. К расчету температуры самонагревания сырья гнездовым сферическим очагом // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сб. науч. тр. Вып. 118 – Харьков: ХГПУ, 2000. – С. 43 – 45.

14 Откидач Д.Н. Разработка системы пожарной сигнализации для объектов хранения зернопродуктов: Дис... канд. техн. наук: 05.26.03. – Харьков. 1999. – 194 с.

15 Плошкевич Ю.В. Температурный контроль тепловых процессов в дисперсной насыпи в хранилищах растительного сырья с целью повышения их пожарной безопасности: Дис... канд. техн. наук: 05.26.01. – М., 1995. – 225 с.

Статья поступила в редакцию 17.03.2003 г.

---

УДК 614.842

*В.В. Тютюник, ст. науч. сотр., АПБУ,  
Н.И. Иванов, д-р. техн. наук, профессор, АПБУ,  
Т.Н. Курская, канд. физ.-мат. наук, ХГТУСА*

## **ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ТЕПЛОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АКТИВНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ**

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований параметров детекторов теплового излучения на основе активных диэлектриков с частотной регистрацией выходного сигнала.

**Постановка проблемы.** Комплекс проведенных исследований физических процессов в нелинейных элементах, происходящих при детектировании и преобразовании тепловых сигналов излучения ИК, СВЧ диапазонов длин волн, дали возможность оптимизировать параметры детекторов различных типов и создать на их основе перспективные приборы и устройства для решения ряда актуальных проблем в области радиофизики, метрологии, экологии, медицины и пожарной техники [1÷11].

**Анализ последних достижений и публикаций.** Решение проблемы повышения технических характеристик детекторов элек-

ромагнитного излучения в диапазоне длин волн  $1 \mu\text{м} - 3 \text{см}$  имеет ряд направлений [1÷11]. Одним из направлений увеличения чувствительности детекторов являются предложения использования новых физических принципов работы чувствительного элемента детекторов теплового излучения.

*Постановка задачи и ее решение.* Целью исследования является обоснование возможности создания высокочувствительного детектора теплового излучения на основе измерения диэлектрических свойств активных диэлектриков, зависящих от температуры.

Активные диэлектрики обладают рядом физико-химических свойств. Важной характеристикой активных диэлектриков является их диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , которая, как правило, зависит от температуры  $T$  [12]. Изменение температуры активных диэлектриков в диапазоне  $-30 \div 80$  °С приводит к изменению диэлектрической проницаемости в  $2 \div 4$  раза [12]. Это явление может быть положено в основу работы чувствительного элемента детектора теплового излучения. Структурная схема такого детектора представлена на рис. 1.

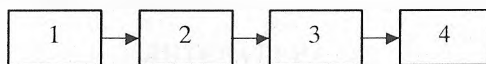


Рисунок 1 – Структурная схема детектора теплового излучения на основе измерения диэлектрической проницаемости активных диэлектриков

Чувствительный элемент 1 представляет собой конденсатор, между обкладками которого находится активный диэлектрик. Элемент 1 параллельно соединен с колебательным контуром 2, который определяет частоту генерации  $\omega_0$  генератора 3. Частота на выходе генератора 3 фиксируется частотомером 4.

Электрическая емкость элемента 1 связана с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  активного диэлектрика. Воздействие теплового излучения на 1 изменяет частоту  $\omega_0 - 2$ , а, следовательно, и частоту на выходе 3.

В качестве генератора 3 использован туннельно-транзисторный генератор с компенсацией дестабилизирующих факторов, подробно описанный в [13, 14]. Такие генераторы с RLC-контурами отличаются высокой долговременной и кратковременной стабильностью частоты колебания.

В измерительной установке проводились измерения частоты генерации  $f_0 = \omega_0/2\pi$  на выходе 3 частотомером ЧЗ-34А. Генератор был изготовлен на основе туннельного диода типа АИ-201 и транзистора типа ГТ313. Добротность резонансных контуров составляла 200-300.