

Н.И. Вагин, П.П. Ваулин, Б.Н. Денчик, Р.Ш. Цвык

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПРОЗРАЧНОСТИ

Рассматривается разработанный в СКВ НИ «Оптика» малогабаритный импульсный измеритель прозрачности. Отличительными особенностями измерителя являются высокая чувствительность измерения прозрачности при значениях, близких к 1, малые габариты и масса, малая длина измерительной трассы.

Приведена функциональная схема, принцип действия измерителя, основные технические характеристики, методика определения чувствительности, результаты испытаний.

Разработка измерителей прозрачности атмосферы является одним из важных направлений атмосферной оптики. Выпускаемый промышленностью регистратор дальности видимости РДВ-3 [1] имеет низкую точность и работает в узком диапазоне прозрачности, что не позволяет проводить измерения при дальности видимости более 6 км и менее -200 м. Описанный в [2] лазерный измеритель имеет лучшие характеристики, но обладает большими габаритами и массой, что не позволяет использовать его при измерениях на самолетах и в ограниченных объемах, например, в помещениях, где требуется контролировать чистоту воздуха при малой концентрации частиц аэрозоля.

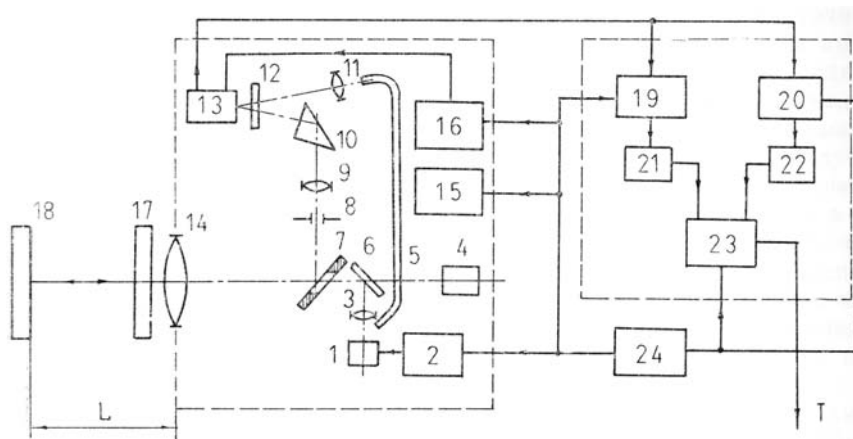


Рис. 1. Функциональная схема измерителя: 1 — излучатель; 2 — генератор импульсов; 3 — линза; 4 — окуляр; 5 — световод; 6 — зеркало поворотное; 7 — зеркало поворотное; 8 — диафрагма; 9 — линза; 10 — призма; 11 — линза; 12 — интерференционный фильтр; 13 — фотоумножитель; 14 — объектив; 15 — система термостабилизации; 16 — источник высоковольтный; 17 — блок смены фильтров; 18 — отражатель; 19, 20 — селективные усилители; 21, 22 — детекторы; 23 — блок вычисления прозрачности; 24 — блок питания измерителя

В данной статье описывается малогабаритный импульсный измеритель прозрачности, работающий по базисному методу, который может найти применение для измерения прозрачности на коротких трассах, в помещениях, за бортом самолета. Преимуществом измерителя является высокая чувствительность измерения прозрачности, малые габариты, применение в качестве отражателя трипсель-призмы, что значительно снижает требования к юстировке приемопередатчика и отражателя на измерительной трассе [3].

Функциональная схема измерителя приведена на рис. 1. Приемопередатчик и отражатель расположены на противоположных концах измерительной трассы. Излучение источника разделяется на два канала — опорный и измерительный. Излучатель работает в импульсном режиме с периодом посылки импульсов τ , определяемым расстоянием L между приемопередатчиком и отражателем

$$\tau = 4L/c, \quad (1)$$

где c — скорость распространения излучения в исследуемой среде. Длительность импульса составляет не более половины периода посылки. Выбор такого периода и длительности импульса приводит к тому, что излучение опорного и измерительного каналов поступает на вход фотоприемника с временным сдвигом $\tau/2$. На рис. 2 приведена временная диаграмма опорного $J_{\text{оп}}$, измерительного $J_{\text{из}}$ и суммарного J сигналов на входе фотоприемника.

Суммарный сигнал $J(t)$ можно записать в следующем виде

$$J(t) = K_1 J_0(t) + T K_2 J_0\left(t + \frac{2L}{c}\right), \quad (2)$$

где $J_0(t)$ – функция, характеризующая изменение во времени интенсивности посылаемой последовательности импульсов излучения; K_1 – коэффициент пропускания оптического тракта опорного канала; K_2 – коэффициент пропускания оптического приемопередающего тракта; T – прозрачность измерительной трассы при двукратном прохождении потока излучения – до отражателя и обратно. Функцию $J_0(t)$ можно представить в виде

$$J_0(t) = \frac{J_m a_0}{\pi} + \frac{2J_m}{\pi} \sum_{\kappa=1}^{\infty} a_{\kappa} \cos \kappa \omega t, \quad (3)$$

где J_m – амплитуда интенсивности посылаемой последовательности импульсов; a_{κ} – коэффициент разложения Фурье; $\omega = \frac{\pi c}{2L}$. Соответственно

$$J_0\left(t - \frac{2L}{c}\right) = \frac{J_m a_0}{\pi} + \frac{2J_m}{\pi} \sum_{\kappa=1}^{\infty} a_{\kappa} \cos \kappa \omega \left(t + \frac{2L}{c}\right). \quad (4)$$

Сумму интенсивностей сигналов $J(t)$ можно представить в виде

$$J(t) = \frac{(K_1 + T K_2) J_m a_0}{\pi} + \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{2[K_1 + (-1)^{\kappa} K_2 T] J_m a_{\kappa}}{\pi} \cos \frac{\pi c}{2L} t. \quad (5)$$

Значение амплитуды первой гармоники i_1 частоты посылок импульсов суммарного светового сигнала на выходе квадратичного фотоприемника составит

$$i_1 = \frac{2(K_1 - K_2 T)}{\pi} J_m a_1, \quad (6)$$

а значение амплитуды второй гармоники i_2 соответственно

$$i_2 = \frac{2(K_1 + K_2 T)}{\pi} J_m a_2. \quad (7)$$

Если при калибровке измерителя обеспечить равенство коэффициентов $K_1 = K_2 = K$, то значение T определится соотношением

$$T = \frac{i_2 - i'_1}{i_2 + i'_1}, \quad \text{где } i'_1 = \frac{a_2}{a_1} i_1. \quad (8)$$

При изменении прозрачности T от 1 до 0 величина амплитуды i'_1 первой гармоники увеличивается от 0 до некоторого максимального значения i'_{10} , а величина амплитуды i_2 второй гармоники соответственно уменьшается от максимального i_{21} до минимального i_{20} значения. Поэтому определение прозрачности исследуемой среды по отношению разности измеренных амплитуд первой и второй гармоник преобразованного суммарного сигнала к их сумме позволяет повысить чувствительность и точность за счет применения дифференциального метода измерения, при котором два измеряемых параметра по-разному реагируют на изменение искомого параметра.

Вследствие шумов фотоприемника и селективного усилителя первой гармоники значение амплитуды первой гармоники при прозрачности, равной 1, имеет конечную величину $i'_{11} = i'_{1\text{ш}}$, отличную от 0. С учетом этого величина прозрачности будет определяться соотношением

$$T = \frac{i_2 - \tilde{i}_1}{i_2 + \tilde{i}_1}, \quad \text{где } \tilde{i}_1 = i'_1 - i'_{1\text{ш}} \quad (9)$$

Величина прозрачности может определяться также из следующих соотношений:

$$T = 1 - \frac{\tilde{i}_1}{i'_{10}} \quad \text{или} \quad T = \frac{i'_2}{i'_{20}} - 1.$$

Измеритель состоит из приемопередатчика, отражателя, устройства вычисления прозрачности, источника питания.

Приемопередатчик выполнен по совмещенной оптической схеме. Апертурой передающего, измерительного каналов и оптического визира служит один и тот же объектив 14. Передающий канал состоит из излучателя 1 на основе светодиода АЛ310А, линзы 3, зеркала 6, объектива. Приемный канал состоит из объектива, зеркала 7, диафрагмы 8, линзы 9, призмы 10. Опорный канал состоит из световода 5, линзы 11. Оптический визир состоит из объектива, окуляра 4. На излучатель подается импульсное напряжение питания от генератора импульсов 2. Фотоприемник состоит из интерференционного фильтра 12 и фотоумножителя 13. На фотоумножитель подается напряжение питания от высоковольтного источника 16. Приемопередатчик термостабилизирован системой 15, и устанавливается на поворотном столе, предназначенном для наводки приемопередатчика на отражатель.

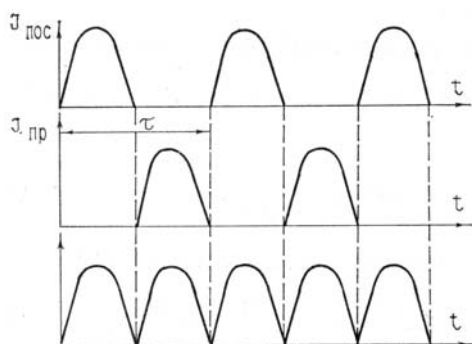


Рис. 2. Временная диаграмма сигналов

Излучение светодиода формируется оптической системой передающего канала в слабодиффракционный пучок. Зеркало 6 имеет напыление, отражающее излучение светодиода с длиной волны 0,67 мкм, но пропускающее излучение в области спектра 0,4–0,6 мкм. В центральной части зеркала 7 имеется отверстие, через которое излучение светодиода проходит к объективу. Поток излучения, возвращенный отражателем 18 на объектив 14, направляется на зеркало 7, проходит через диафрагму 8, установленную в фокальной плоскости объектива, линзой 9 формируется в пучок, который призмой 10 направляется через интерференционный фильтр на фотокатод фотоумножителя.

Часть потока излучения светодиода направляется по световоду. Излучение, выходящее из противоположного торца световода, формируется линзой 11 в пучок, который через интерференционный фильтр направляется на тот же участок фотокатода, на который приходит пучок излучения приемного канала. Совмещение пучков необходимо для устранения влияния неравномерности чувствительности фотокатода по его поверхности. Величина потока излучения опорного канала может изменяться для подбора величины сигнала опорного канала с помощью узла регулировки при калибровке измерителя.

Наводка приемопередатчика на отражатель контролируется с помощью оптического визира.

Отражатель 8 состоит из зеркальной трипель-призмы, держателя, бленды с подогревом для предотвращения запотевания в условиях повышенной влажности.

Устройство вычисления состоит из селективных усилителей 19, 20 первой и второй гармоник, детекторов 21, 22, блока вычисления прозрачности 23. Значения прозрачности выдаются блоком вычисления прозрачности на индикаторе.

Основные технические характеристики измерителя

Длина волны излучения, мкм	0,67
Частота посылаемых импульсов излучения, МГц	5
Расстояние между ППД и отражателем, м	15
Диапазон измерения прозрачности	0,99–0,6
Чувствительность по первой гармонике сигнала на 1% изменения прозрачности, мкВ/%	45
Габариты приемопередатчика, мм	300 × 250 × 200
Масса приемопередатчика с поворотным столом, кг	12

Измерение чувствительности и калибровка измерителя проводились по следующей методике. Приемопередатчик и отражатель устанавливались в закрытом оптическом коридоре для исключения фоновых засветок. Перед объективом устанавливается блок: смены фильтров–ослабителей 17 с

различными коэффициентами ослабления. Диапазон изменения прозрачности, реализуемый на измерительной трассе, составлял 1÷0.

В качестве фильтров–ослабителей использовались металлические нити, располагаемые по диаметру объектива. Необходимость использования в качестве фильтров–ослабителей металлических нитей обусловлена отсутствием калиброванных фильтров с малыми значениями коэффициентов ослабления. Коэффициент ослабления потока излучения нитью η рассчитывается так же, как для случая рассеивания единичным протяженным круговым цилиндром при перпендикулярном падении на него потока излучения.

При расчете использовались следующие обозначения: λ – длина волны излучения; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; d – диаметр нити; d_1 – диаметр объектива; α_0 – угловая расходимость пучка излучения передатчика; α – угловое поле зрения приемника.

Для крупных непрозрачных рассеивателей [4] сечение ослабления оптического излучения равно удвоенному геометрическому сечению за счет экранирования и дифракции излучения. Так как угловое поле зрения приемника конечно и часть дифрагированных лучей попадает на приемник, фактор ослабления нити K представим как

$$K = 1 + \omega, \quad (10)$$

где ω – дифракционные потери

$$\omega = 1 - \frac{\int_{-\frac{\alpha/2}{+\infty}}^{\alpha/2} \left[\frac{\sin \kappa d \varphi}{\kappa d \varphi} \right]^2 d\varphi}{\int_{-\infty}^{\alpha} \left[\frac{\sin \kappa d \varphi}{\kappa d \varphi} \right]^2 d\varphi}. \quad (11)$$

Обозначив $\beta = \frac{\kappa d \varphi}{2}$, получим

$$\omega(\beta) = 1 - \frac{2}{\pi} \left[\frac{\cos \beta}{\beta} - \frac{1}{\beta} + \text{Si}(\beta) \right], \quad (12)$$

где $\text{Si}(\beta)$ – интегральный синус.

Потери потока излучения при прямом распространении составят

$$\Phi_{\text{пр}} = KSE_0, \quad (13)$$

где S – геометрическое сечение нити; E_0 – освещенность на выходе приемопередатчика.

Аналогично потери при обратном распространении

$$\Phi_{\text{обр}} = KSEJ(0)$$

где E – освещенность на входе объектива приемника; $J(0)$ – множитель, учитывающий неравномерность освещенности в плоскости, перпендикулярной распространению, обусловленную внесением нити в пучок излучения.

E имеет меньшее значение, чем E_0 из-за расходимости излучения

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \left[\frac{d_1 + \alpha_0 z}{d_1} \right]^2, \quad (15)$$

где $z/2$ – расстояние от нити до отражателя.

Для области дифракции Фраунгофера распределение интенсивности будет иметь вид

$$J(x) = 1 - \frac{2d}{\Delta} \cos \frac{\pi x}{\Delta^2} \frac{\sin \frac{\kappa dx}{z}}{\frac{\kappa dx}{z}} + \frac{d^2}{\Delta^2} \left[\frac{\sin \frac{\kappa dx}{z}}{\frac{\kappa dx}{z}} \right]^2, \quad (16)$$

где x — поперечная координата, отсчитываемая от продольной оси нити; $\Delta = \sqrt{\lambda z}$ — радиус первой зоны Френеля.

При достаточном удалении, когда $d \ll \Delta$ и $\frac{kd^2}{z} \ll 1$, в пределах ширины нити $J(x) = J(0)$.

$$J(0) = 1 - 2\left(\frac{d}{\Delta}\right) + \left(\frac{d}{\Delta}\right)^2 = \left(1 - \frac{d}{\Delta}\right)^2. \quad (17)$$

В целом доля ослабления излучения нитью составляет

$$\eta = \frac{KSE_0 + KSEJ(0)}{S_1 E}, \quad (18)$$

где $s_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$ — площадь приемного объектива.

Окончательно получим

$$\eta = \frac{4}{\pi} \frac{d}{d_1} [1 + \omega(\beta)] [\varepsilon + J(0)]. \quad (19)$$

Для заданной схемы размещения нити непосредственно перед апертурой приемопередатчика по ее диаметру имеем следующие значения параметров: $\lambda = 0,67$ мкм; $\alpha = \alpha_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ радиан; $z = 29,8$ м;

$d_1 = 80$ мм; $\Delta = \sqrt{\lambda z} = 4,47$ мм; $\varepsilon = \left[\frac{d_1 + \alpha_0 z}{d_1}\right]^2 = 4,48$, $\frac{k\alpha}{2} = 0,01407$ мкм $^{-1}$.

Результаты расчета η по соотношению (19) для данных параметров приведены в таблице. Относительная погрешность $\delta\eta$ рассчитана в предположении, что $\delta\alpha = \delta\alpha_0 = 0 = 10\%$.

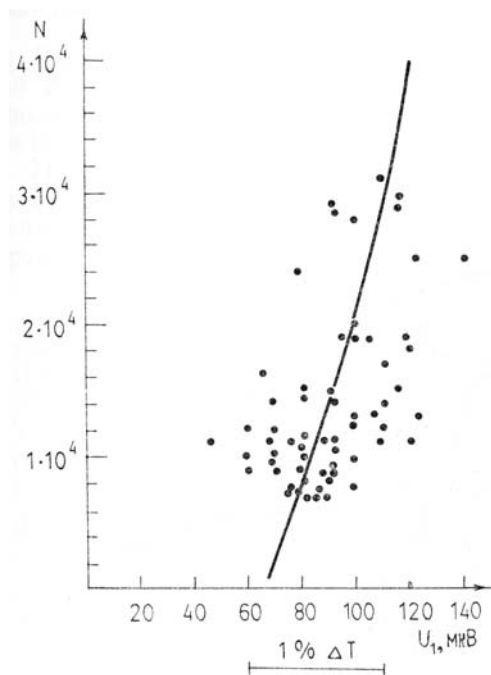


Рис. 3. Зависимость напряжения первой гармоники сигнала от количества аэрозолей в 1 литре воздуха

d , мкм	η	$\delta\eta$, %	$T = 1 - \eta$
10	0,001703	8,63	0,9983
15	0,002525	8,65	0,9975
20	0,00333	8,65	0,9967
40	0,006343	8,71	0,9937
60	0,009055	8,79	0,9909
80	0,01147	8,90	0,9885
100	0,01364	9,02	0,9864
120	0,01557	9,15	0,9844
140	0,01733	9,27	0,9827
160	0,01899	9,36	0,98101
180	0,0205	9,42	0,9795
200	0,02187	9,43	0,9781
250	0,02526	9,29	0,9747
300	0,028816	9,05	0,9712
350	0,03273	8,92	0,9673
400	0,037045	8,91	0,962955
450	0,04156	8,94	0,95844
500	0,04605	8,98	0,95395
550	0,050306	9,03	0,94964
600	0,054423	9,10	0,9458

Проведена экспериментальная проверка зависимости приращения величины сигнала первой гармоники при установке металлической нити $d = 100$ мкм и $d = 200$ мкм. Величина изменения прозрачности на трассе составила 1 и 2% с погрешностью 0,25%, что лежит в пределах расчетных значений (см. табл. 1).

Проведены сравнительные измерения изменения величины первой гармоники от количества аэрозолей в единице объема атмосферы. Количество аэрозолей в единице объема измерялось счетчиком

аэрозольных частиц ПК ГТА-0,3-0,002. Заборник воздуха располагается непосредственно на трассе измерения прозрачности. Результаты измерений приведены на рис. 3. По вертикальной оси отложены значения количества аэрозолей в 1 л воздуха размером 0,3 мкм и выше, по горизонтальной оси величины сигнала первой гармоники. Величина приращения сигнала первой гармоники на 1% изменения прозрачности составляла 45 мкВ. Собственные шумы приемопередающего тракта составляли 30 мкВ при полосе пропускания приемного тракта 1 кГц. На рис. 3 видно, что с увеличением количества аэрозолей на 10^4 ед. в 1 л воздуха происходит изменение величины прозрачности примерно 0,5%.

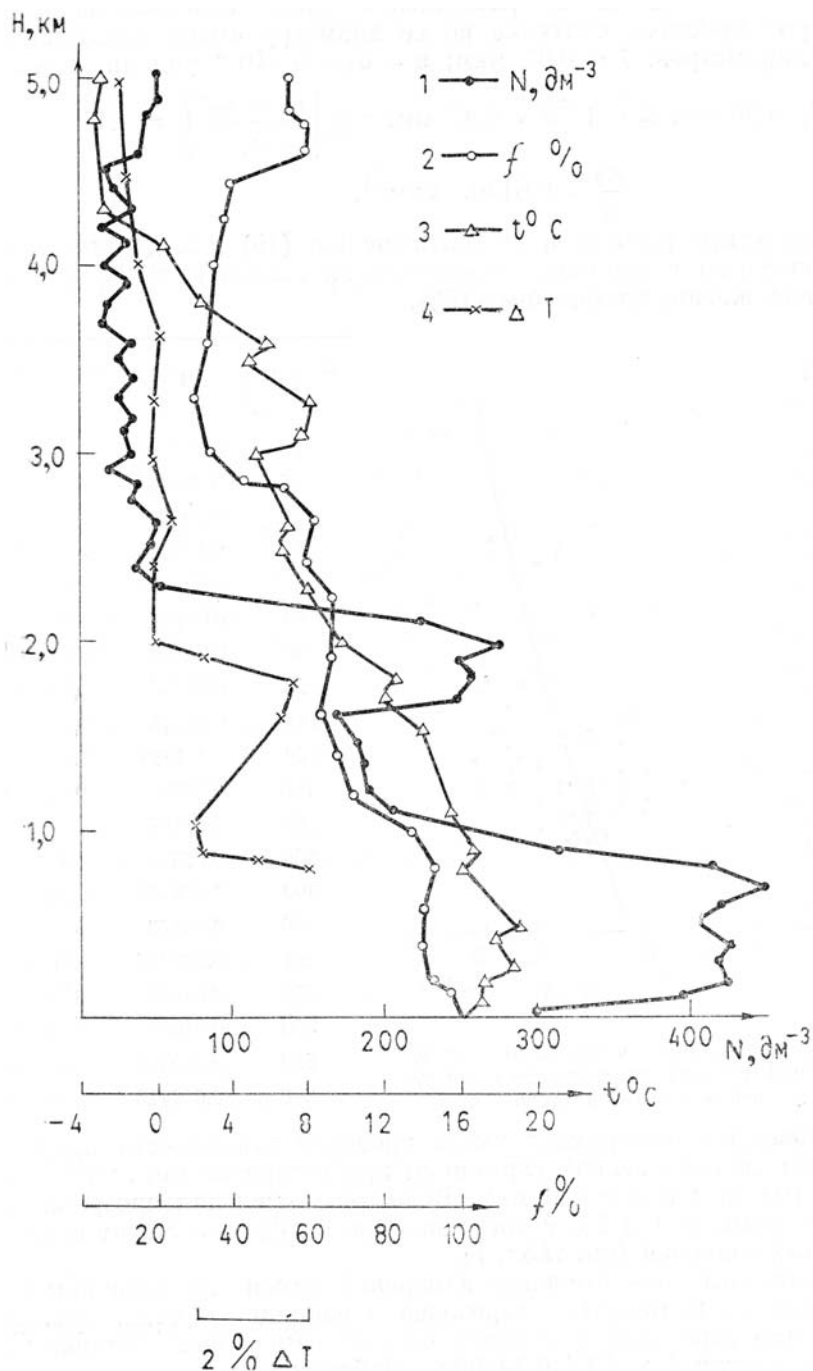


Рис. 4. Зависимость изменения прозрачности от высоты: 1 — концентрация аэрозоля; 2 — относительная влажность; 3 — температура; 4 — изменение прозрачности

Сплошная кривая рассчитана методом наименьших квадратов. Уравнение кривой имеет вид

$$U = 66,77 + 19,4 N - 1,27 N^2, \quad (20)$$

где U [мкВ], N [тыс. шт.]. Коэффициент корреляции $R = 0,56$.

Проводились также измерения изменения прозрачности в зависимости от высоты. Для этого измеритель устанавливался на самолете. Результаты одного из циклов измерения прозрачности приведены на рис. 4, на котором хорошо видно слоистое распределение аэрозольной компоненты, что согласуется с результатами нефелометрических измерений для условий малооблачной атмосферы [5], проведенных многоканальным нефелометром с борта самолета.

Влияние фоновой засветки на показания прибора наблюдается при нахождении солнца в пределах 15° поля зрения объектива, что при проведении измерений на борту самолета реализуется весьма редко.

Выводы

Разработан и прошел первые испытания малогабаритный импульсный измеритель прозрачности атмосферы с малой базой, в котором использован в качестве излучателя светодиод с длиной волны излучения 0,67 мкм.

Измеритель может найти применение при измерениях прозрачности атмосферы на трассах с ограниченными габаритами, например, в камерах тонкой очистки воздуха, в подвижных объектах— самолетах, морских судах и т.д.

1. Стернат М. С. Метеорологические приборы и измерения. — Л.: Гидрометеиздат, 1978, с. 278.
2. Ивакин Ю. А., Шапиро И. Я. — В сб.: Измерение оптико-метеорологических параметров атмосферы с использованием лазерного излучения. — Томск, 1980, с. 28.
3. А. с. 1318862 СССР. Способ определения прозрачности оптической среды/ П.П. Ваулин, Б.Н. Денчик, Г.О. Задде. — Оpubл. в Б. И., 1987, № 23.
4. Кабанов М. В. Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Ч. 1. Отдельные частицы. — Томск: Изд-е ТФ СО АН СССР, 1983, с. 113.
5. Максимюк В. С., Танташев М. В., Семенов Л. С. — ОМП, 1987, № 6, с. 20—22.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
СКВ НИП «Оптика», Томск

Поступила в редакцию
22 января 1988 г.

N. I. Vagin, P. P. Vaulin, B. N. Denchik, R. Sh. Tsvyk. Compact Pulsed Transmittance Meter.

A compact pulsed transmittance meter developed at the Special Designing Bureau «Optika» SB USSR Academy of Sciences is described.

The advantages of the proposed instrument are as follows:

- High detection sensitivity for an atmospheric transmittance approaching 1;
- small dimensions and mass;
- short atmospheric paths.

Technical data, block-diagram and operation of the meter are considered. The measurement technique and the field test results are discussed.