

## ДВУХЧАСТОТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ТВЕРДЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Р. Кнехель<sup>1</sup>, А. М. Линкова<sup>2</sup>, А. Л. Теплюк<sup>1</sup>, Г. И. Хлопов<sup>2</sup>, К. Шенеманн<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Технический университет, Kaiserstrasse 2, D 24143 Kiel, Германия  
E-mail: [mb@tf.uni-kiel.de](mailto:mb@tf.uni-kiel.de)

<sup>2</sup>Институт радиопластики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [khlopov@ire.kharkov.ua](mailto:khlopov@ire.kharkov.ua)

Рассматривается метод двухчастотного дистанционного зондирования полидисперсного потока частиц твердых аэрозолей для оценки их размеров. Приведены результаты численного моделирования, что позволяет оценить рамки применимости метода и влияние полидисперсности рассеивающей среды. Приводятся результаты разработки измерительного стенда и данные моделирования твердых аэрозолей с помощью калиброванных частиц морского песка. Ил. 20. Табл. 2. Библиогр.: 16 назв.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, радар, эффективная поверхность рассеяния, дифференциальная эффективная поверхность рассеяния.

Загрязнение атмосферы является одним из серьезных факторов риска для здоровья человека [1]. Тем не менее, миллионы тонн твердых аэрозолей (асбест, угольная пыль, тяжелые металлы и др.) ежегодно оседают на территорию Европы. При этом промышленные выбросы (в основном, тепловыми электростанциями, металлургическими и цементными комбинатами) составляют не менее 25 % от общего количества атмосферных загрязнений. Исходя из этого Европейский союз установил стандарты на качество атмосферы, которые достаточно жестко ограничивают количество твердых аэрозолей в атмосфере [2]. Поэтому мониторинг промышленных выбросов, например вблизи дымовых труб, является актуальной задачей.

В настоящее время разработано достаточно много различных датчиков для мониторинга наличия твердых аэрозолей в атмосфере, которые используют аэродинамическое разделение частиц аэрозолей по размерам [3], каскадное соединение отборников проб воздуха [4], спектрометрические измерения поглощения [5] и др. Как правило, подобные датчики обеспечивают хорошую точность в широком диапазоне изменения размеров частиц аэрозолей. Однако их работа основана на исследовании проб воздуха с использованием контактных методов в ограниченных объемах, и они не могут применяться для дистанционных измерений, которые крайне желательны для мониторинга промышленных выбросов. При этом разработка методов измерения размеров аэрозолей является важным этапом на пути решения проблемы в целом.

Значительный интерес представляет разработка дистанционных методов зондирования с применением радара. В работе [6] было предложено применение двухчастотного радара для определения размеров монодисперсного облака частиц в дождях, а в работе [7] исследованы ха-

рактеристики метода при зондировании монодисперсного облака твердых аэрозолей.

Учитывая, что в реальной ситуации облако частиц, как правило, состоит из частиц разных размеров (полидисперсная среда), представляет интерес выяснить особенности применения двухчастотного радиолокационного зондирования для случая полидисперсной среды.

**1. Двухчастотное зондирование полидисперсной среды.** В случае полидисперсной среды облако аэрозолей состоит из частиц разных размеров, причем, как показывают многочисленные измерения, распределение частиц по размерам может быть аппроксимировано логарифмически нормальным законом [8]

$$F(r) = \frac{1}{rg\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \frac{r}{s}}{g}\right)^2\right], \quad (1)$$

где  $s$  и  $g$  – параметры распределения, которые можно выразить через значения моды  $r_{mod}$  и его ширины  $\Delta r$  (на уровне  $1/e$ ):

$$s = r_{mod} \exp\left(\frac{1}{2} \operatorname{arsh}^2 \frac{\Delta r}{2r_{mod}}\right), \quad (2)$$

$$g = \frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{arch} \frac{\Delta r}{2r_{mod}}.$$

На рис. 1 приведен вид функции распределения  $F(r)$  (1) в логарифмическом масштабе для разных значений нормированной ширины закона распределения  $\Delta \bar{r} = \frac{\Delta r}{r_{mod}}$ .

Как видно, увеличение ширины распределения частиц по размерам осуществляется в первую очередь за счет крупных частиц, что играет важную роль при формировании рассеянного поля.

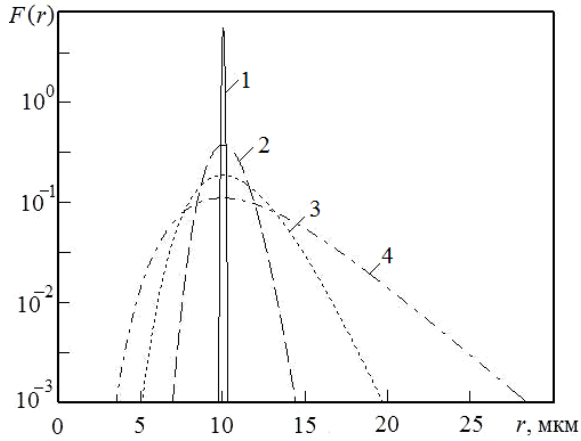


Рис. 1. Логарифмически нормальное распределение: 1 –  $\Delta\bar{r} = 0,02$ ; 2 –  $\Delta\bar{r} = 0,3$ ; 3 –  $\Delta\bar{r} = 0,6$ ; 4 –  $\Delta\bar{r} = 1$

В приближении некогерентного объемного рассеяния [9], которое традиционно используется в задачах дистанционного зондирования, удельное значение эквивалентной площади рассеяния (ЭПР) записывается в виде

$$\sigma_s = N_T \sum_{n=1}^{N_T} \sigma_0(r_n) F(r_n), \quad (3)$$

где  $N_T$  – общее число частиц в единице объема;  $\sigma_0(r_n)$  – ЭПР  $n$ -й частицы радиусом  $r_n$ . Если размеры частиц аэрозоля существенно меньше рабочей длины волны  $\lambda$ , то форму частиц можно считать сферической, что позволяет использовать строгое решение задачи о рассеянии на диэлектрической сфере [10] (теория Ми). Кроме того, так как концентрация частиц в реальной ситуации принимает весьма большие значения  $N_T = 10^8 \div 10^9$  ( $\text{м}^{-3}$ ) [11, 12], то в выражении (3) можно перейти к непрерывному распределению.

Используя программу для вычисления ЭПР [7], разработанную на основе алгоритма [11], нами проведено численное моделирование рассеяния электромагнитной волны полидисперсной средой. На рис. 2 приведены результаты расчета среднего значения ЭПР в единице объема  $\bar{\sigma}_s = \frac{1}{N_T} \sigma_s$  для сферических частиц из диэлектрика с параметрами  $\text{Re } \hat{\epsilon} = 10, \text{Im } \hat{\epsilon} = 0$  и в зависимости от дифракционного параметра

$$\rho_{mod} = \frac{2\pi}{\lambda} r_{mod} \sqrt{\epsilon}.$$

Как видно, полидисперсный характер среды существенно сглаживает зависимость удельной ЭПР по сравнению с аналогичной зависимостью (кривая 1) для монодисперсной среды  $\Delta\bar{r} \rightarrow 0$  [7] за счет статистического усреднения по размерам частиц. При этом, как и ранее [7], характер кривых мало зависит от величины ди-

электрической проницаемости частиц для больших значений проницаемости  $\text{Re } \hat{\epsilon} \geq 4 \div 5$  (рис. 3).

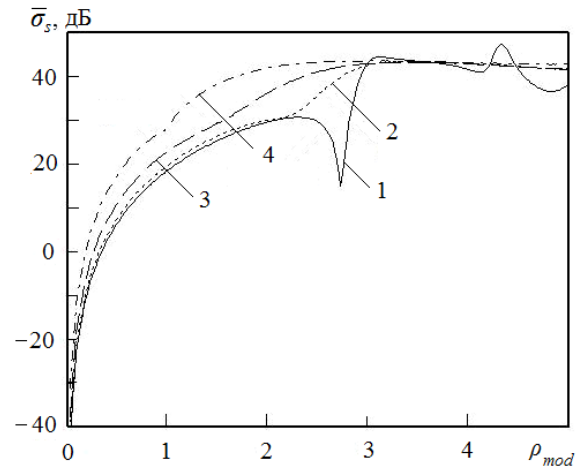


Рис. 2. Среднее значение удельной ЭПР: 1 –  $\Delta\bar{r} = 0,02$ ; 2 –  $\Delta\bar{r} = 0,3$ ; 3 –  $\Delta\bar{r} = 0,6$ ; 4 –  $\Delta\bar{r} = 1$

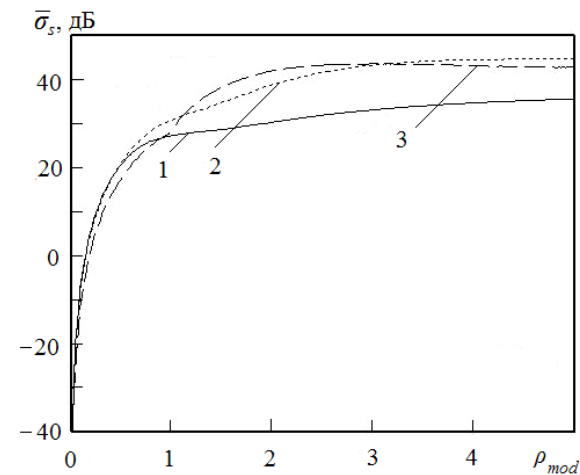


Рис. 3. Влияние  $\text{Re } \hat{\epsilon}$  на ЭПР полидисперсной среды ( $\text{Im } \hat{\epsilon} = 0, \Delta\bar{r} = 1$ ): 1 –  $\text{Re } \hat{\epsilon} = 2$ ; 2 –  $\text{Re } \hat{\epsilon} = 5$ ; 3 –  $\text{Re } \hat{\epsilon} = 10$

Указанные значения проницаемости характерны для большинства веществ, которые формируют состав промышленных выбросов [12, 13], в связи с чем отмеченная особенность поведения ЭПР позволяет упростить решение обратной задачи определения параметров распределения по данным дистанционного зондирования.

В то же время увеличение мнимой части диэлектрической проницаемости ведет к некоторому уменьшению ЭПР для больших значений параметра  $\rho_{mod} \geq 2$  (рис. 4).

Однако, в случае значительных диэлектрических потерь  $\text{Im } \hat{\epsilon} \geq 0,5$ , увеличение мнимой части диэлектрической проницаемости не приводит к заметным изменениям значения ЭПР полидисперсной среды, что важно при зондировании

влажного облака аэрозолей, уменьшая зависимость результатов от содержания влаги.

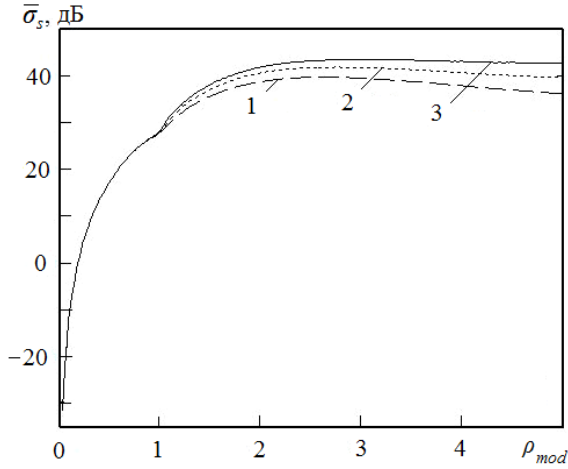


Рис. 4. Влияние диэлектрических потерь на ЭПР полидисперсной среды ( $\text{Re } \dot{\epsilon} = 10, \Delta\bar{r} = 1$ ): 1 –  $\text{Im } \dot{\epsilon} = 1$ ; 2 –  $\text{Im } \dot{\epsilon} = 0,3$ ; 3 –  $\text{Im } \dot{\epsilon} = 0$

Возвращаясь к выражению (3), отметим, что удельное значение ЭПР зависит также от концентрации частиц (количество частиц в единице объема). Поэтому рассмотрим величину дифференциальной ЭПР (ДЭПР) в виде отношения удельных значений ЭПР, измеренных на двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  [7], которая не зависит от концентрации частиц  $N_T$  ( $\text{м}^{-1}$ ):

$$\sigma_D = \frac{\sigma_s(\lambda_1)}{\sigma_s(\lambda_2)} = \frac{\int_0^\infty dr \sigma_0(r, \lambda_1, \dot{\epsilon}_1) F(r)}{\int_0^\infty dr \sigma_0(r, \lambda_2, \dot{\epsilon}_2) F(r)}. \quad (4)$$

Предположив отсутствие частотной дисперсии диэлектрической проницаемости, была рассчитана зависимость ДЭПР для частиц аэрозоля из диэлектрика с  $\dot{\epsilon} = 10 - j0,4$  при разной ширине закона распределения  $\Delta\bar{r}$  и произвольном соотношении между длинами волн  $\lambda_1 = \alpha\lambda_2$ . Эта зависимость представлена на рис. 5: 1 –  $\Delta\bar{r} = 0,02$ ; 2 –  $\Delta\bar{r} = 0,3$ ; 3 –  $\Delta\bar{r} = 0,6$ ; 4 –  $\Delta\bar{r} = 1$ .

В отличие от монодисперсной среды, вид ДЭПР для полидисперсного аэрозоля в значительной мере зависит от выбора рабочих длин волн: минимальной  $\lambda_1 = \lambda_{\min}$  и максимальной  $\lambda_2 = \lambda_{\max}$ . В частности, при сопоставимых значениях используемых длин волн  $\alpha \geq 0,4$  ( $\lambda_{\min} \cong \lambda_{\max}$ ), величина ДЭПР сложным образом зависит от модального параметра  $\rho_{mod}$  (рис. 5, а, б). В то же время для малых значений отношения длин волн  $\alpha \leq 0,2$  ( $\lambda_{\min} \leq 0,2\lambda_{\max}$ ) ДЭПР имеет значительный по своей длине пада-

ющий участок, особенно для «широкого» распределения частиц по размерам  $\Delta\bar{r} \geq 1$ .

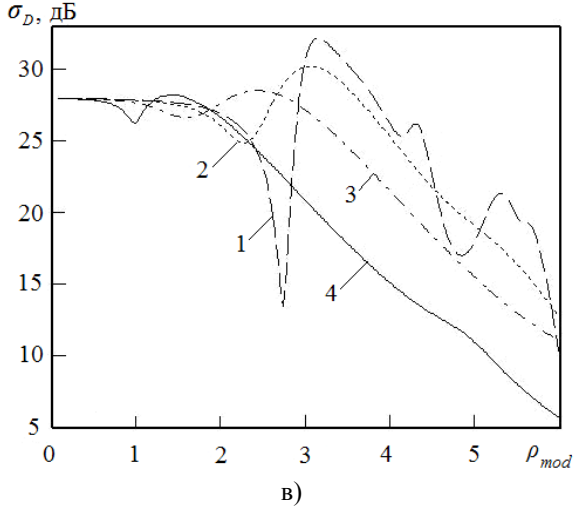
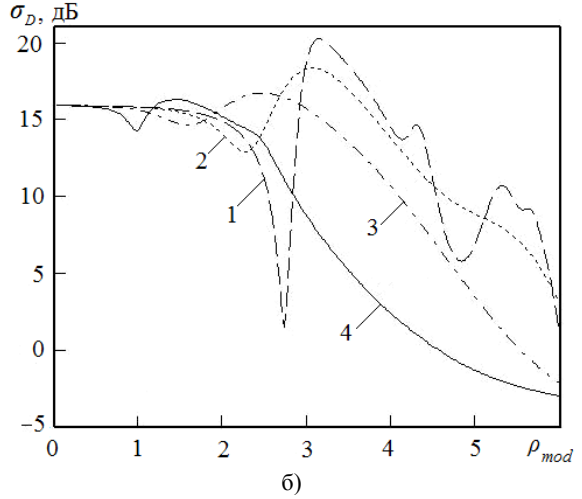
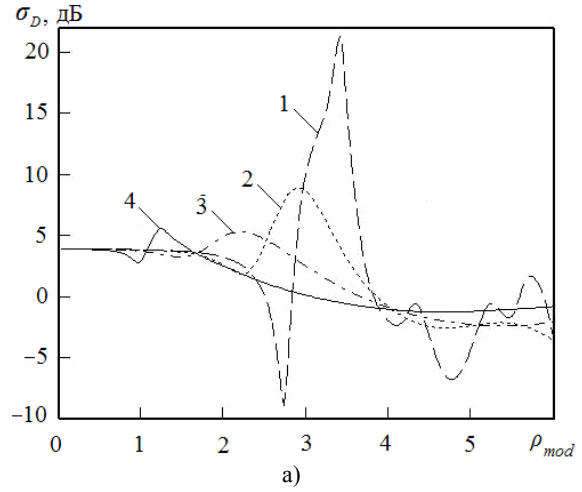


Рис. 5. Зависимость ДЭПР для разных значений параметра  $\alpha$ : а) –  $\alpha = 0,8$ ; б) –  $\alpha = 0,4$ ; в) –  $\alpha = 0,2$

Заметим, что ДЭПР зависит от многих параметров, следовательно, двухчастотное зон-

дирование не позволяет решить обратную задачу в принципе. Поэтому рассмотрим задачу оценки эффективных параметров облака аэрозолей при условии наличия априорной информации о диэлектрических параметрах аэрозоля.

Наиболее естественно эффективные параметры среды можно ввести для «узкого» распределения частиц по размерам  $\Delta\bar{r} \ll 1$  [7], когда полидисперсные аэрозоли могут быть аппроксимированы монодисперсной средой (рис. 6).

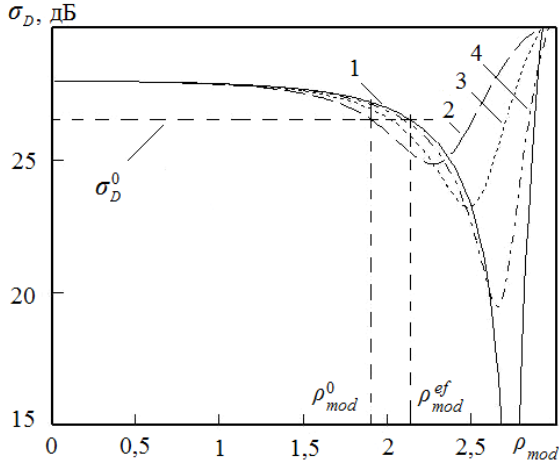


Рис. 6. Оценка эффективного размера частиц для аэрозоля с «узким» распределением частиц ( $\varepsilon = 10 - j0,4$ ,  $\alpha = 0,2$ ): 1 –  $\Delta\bar{r} = 0$ ; 2 –  $\Delta\bar{r} = 0,3$ ; 3 –  $\Delta\bar{r} = 0,2$ ; 4 –  $\Delta\bar{r} = 0,1$

В этом случае вычисление эффективного размера частиц производится путем численного решения трансцендентного уравнения

$$\begin{cases} \sigma_D^m(\rho_{mod}^{ef}) = \sigma_D^0; \\ r_{mod}^{ef} = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{|\varepsilon|}} \rho_{mod}^{ef}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\sigma_D^m(r)$  – ДЭПР для монодисперсной среды;  $\sigma_D^0$  – измеренное значение ДЭПР;  $\rho_{mod}^{ef}$ ,  $r_{mod}^{ef}$  – «эффективные» значения модального параметра и моды распределения частиц. На рис. 6 для наглядности также показано графическое решение уравнения (5), когда по измеренному значению ДЭПР  $\sigma_D^0$  находится значение эффективного модального параметра  $\rho_{mod}^{ef}$ .

Измерение величины эффективной моды распределения частиц позволяет оценить важные для практики эффективные параметры аэрозоля, включая концентрацию  $N_T^{ef}$  ( $\text{м}^{-3}$ ) и удельную массу (*mass loading* [7, 12, 13])  $M_L^{ef}$  ( $\text{г}/\text{м}^3$ ):

$$\begin{cases} N_T^{ef} = \frac{\sigma_s}{\sigma_0(\rho_{mod}^{ef})}; \\ M_L^{ef} = N_T^{ef} \frac{4}{3} \pi (r_{mod}^{ef})^3 \rho_V, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\sigma_s$  – значение удельной ЭПР, измеренное на  $\lambda_1$ ;  $\sigma_0(r_{mod}^{ef})$  – ЭПР частицы радиусом  $r_{mod}^{ef}$ ;  $\rho_V$  – объемная плотность частиц,  $\text{г}/\text{м}^3$ .

При этом истинное значение параметра равно  $\rho_{mod}^0$  (рис. 6) и анализ отклонения эффективной моды полидисперсной среды  $r_{mod}^{ef}$  от ее истинного значения  $r_{mod}^0$  не превышает

$$\delta_r = \left| \frac{r_{mod}^{ef} - r_{mod}^0}{r_{mod}^0} \right| \leq 15\% \quad \text{в области значений } \Delta\bar{r} \leq 0,3.$$

Отметим, что возможности рассмотренного подхода ограничиваются не только ошибками измерений, но также размерами области однозначного измерения моды распределения  $r_{min} \leq r_{mod} \leq r_{max}$  по причине немонотонного характера зависимости ДЭПР (рис. 5). В отличие от монодисперсной среды, для полидисперсных аэрозолей верхняя граница зависит от ширины закона распределения  $r_{max}(\Delta\bar{r})$ , что существенно сужает область применимости рассматриваемого метода. Как показывают оценки, указанная зависимость может быть с достаточной точностью аппроксимирована выражением

$$r_{max}(\Delta\bar{r}) = r_{max}^{mono} - \frac{\lambda}{\pi\sqrt{\varepsilon}} (\Delta\bar{r})^{1,55}, \quad (7)$$

где  $r_{max}^{mono}$  – верхняя граница для монодисперсной среды [7], которая для больших значений диэлектрической постоянной материала частиц  $\text{Re } \varepsilon \geq 5$  определяется первым минимумом зависимости ЭПР от дифракционного параметра  $\rho_{mod}$  (рис. 2,  $\Delta\bar{r} = 0,02$ ) и записывается в виде

$$r_{max}^{mono} \cong 0,44 \frac{\lambda_{min}}{\sqrt{|\varepsilon|}}.$$

Нижняя граница  $r_{min}$  определяется достижимой точностью измерения  $\Delta\sigma_{изм}$  удельной ЭПР облака аэрозолей, как и в случае монодисперсной среды, и находится в результате решения трансцендентного неравенства [7]

$$40 \lg \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - \sigma_D(r_{min}) \geq \Delta\sigma_{изм}, \quad (8)$$

где значения ДЭПР  $\sigma_D(r_{min})$  и  $\Delta\sigma_{изм}$  выражены в децибелах.

В результате, как показывает анализ, увеличение модуля диэлектрической проницаемости и ширины распределения частиц по размерам приводит к уменьшению диапазона измеряемых размеров до значения  $\cong 25\%$  для ширины распределения частиц  $\Delta\bar{r} = 0,3$ , поэтому разработка методов расширения пределов измерения эффек-

тивных размеров частиц представляет значительный интерес.

Продолжая анализ возможностей двухчастотного метода зондирования твердых аэрозолей, рассмотрим возможность оценки эффективных размеров частиц в другом предельном случае: для широких распределений  $\Delta\bar{r} \gg 1$ . Этот случай представляет особый интерес, так как аппроксимация опубликованных данных [12, 13] показывает, что абсолютное большинство твердых аэрозолей антропогенного и естественного происхождения имеют достаточно «широкие» распределения  $\Delta\bar{r} \in [2, 10]$ .

На рис. 7 приведены результаты расчета ДЭПР для широких распределений частиц по размерам, которые показывают, что в области значений  $\Delta\bar{r} \geq 4$  вид ДЭПР меняется мало. Это позволяет выбрать в качестве «эталонной» зависимости выражение ДЭПР для широкого распределения частиц  $\sigma_D^p(\rho_{mod}^{ef})$  вместо модели монодисперсной среды  $\sigma_D^m(\rho_{mod}^{ef})$  в системе уравнений (5). В этом случае определение эффективной моды распределения производится путем решения трансцендентного уравнения

$$\begin{cases} \sigma_D^p(\rho_{mod}^{ef}) = \sigma_D^0; \\ r_{mod}^{ef} = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{\varepsilon}} \rho_{mod}^{ef}. \end{cases} \quad (9)$$

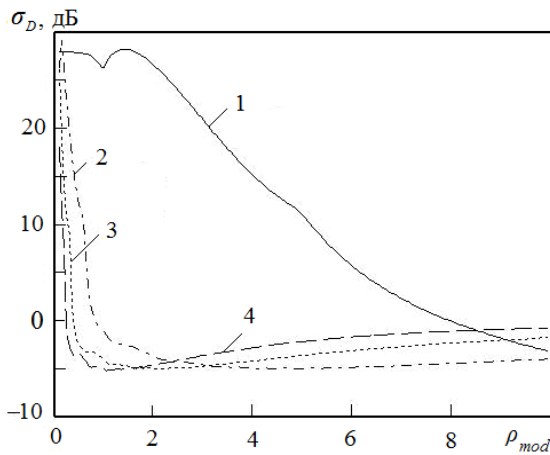


Рис. 7. Зависимость ДЭПР для широких распределений ( $\dot{\varepsilon} = 10 - j0,4$ ,  $\alpha = 0,2$ ): 1 –  $\Delta\bar{r} = 1$ ; 2 –  $\Delta\bar{r} = 4$ ; 3 –  $\Delta\bar{r} = 6$ ; 4 –  $\Delta\bar{r} = 8$

На рис. 8 приведено нормированное отклонение  $\delta_r$  эффективной моды распределения полидисперсной среды  $r_{mod}^{ef}$  от ее истинного значения  $r_{mod}^0$  в зависимости от нормированной ширины распределения частиц  $\Delta\bar{r}$ .

При этом в качестве «эталонной» зависимости используется зависимость ДЭПР, рас-

считанная при значении ширины логнормального закона распределения = 6.

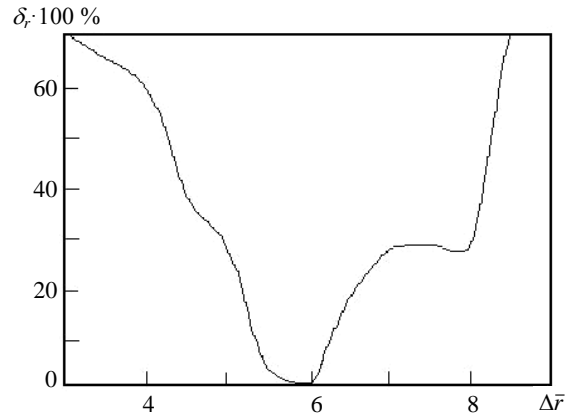


Рис. 8. Отличие эффективной моды от истинного значения

Как видно, отклонение не превышает 50 % в достаточно больших пределах изменения ширины распределения  $\Delta\bar{r} \in (4, 8)$ , что выгодно отличает случай полидисперсной среды от монодисперсной.

Вместе с тем следует отметить, что диапазон однозначного измерения моды распределения  $r_{min} \leq r_{mod} \leq r_{max}$  также расширяется, что обусловлено разным характером зависимости ДЭПР для широких распределений. Более подробный анализ ДЭПР для широких распределений в области малых значений модального параметра  $\rho_{mod}$  (рис. 9) показывает, что в данном случае диапазон измеряемых значений моды составляет 72 % ( $0,15 \leq \rho_{mod} \leq 0,32$ ).

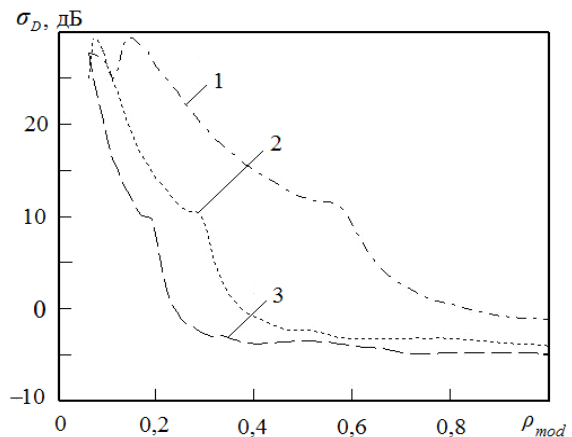


Рис. 9. ДЭПР полидисперсного аэрозоля при  $\rho_{mod} < 1$  ( $\dot{\varepsilon} = 10 - j0,4$ ;  $\alpha = 0,2$ ): 1 –  $\Delta\bar{r} = 4$ ; 2 –  $\Delta\bar{r} = 6$ ; 3 –  $\Delta\bar{r} = 8$

Необходимо отметить, что приведенные количественные оценки получены для рассматриваемых значений параметров задачи и в общем случае подлежат уточнению для каждой конкретной задачи.

Таким образом, использование двухчастотного метода дистанционного зондирования аэрозолей позволяет получить удовлетворительные результаты в двух предельных случаях – «узкого»  $\Delta\bar{r} \leq 0,3$  и «широкого»  $\Delta\bar{r} \geq 4$  распределений частиц по размерам. Однако в промежуточной области  $0,3 < \Delta\bar{r} < 4$  необходимо привлечение другого, более универсального метода зондирования полидисперсных аэрозолей.

**2. Аппаратура и методика экспериментальных исследований.** Целью экспериментального исследования является измерение эффективных параметров модели аэрозоля в виде морского песка с «узким» распределением частиц по размерам, для чего разработан стенд для измерения удельного значения ЭПР потока частиц в двух частотных диапазонах (4)–(6).

Используя уравнение радиолокации для объемных рассеивателей [9, 14], запишем выражение для удельной ЭПР в рамках традиционных приближений [15] и без учета затухания в аэрозоле ввиду его малости:

$$\sigma_s = \frac{P_R}{P_T} \frac{(4\pi)^3}{G_{0T} G_{0R} \lambda^2 V_{ef}}, \quad (9)$$

где  $P_r, P_t$  – принимаемая и передаваемая мощности;  $G_{0R}, G_{0T}$  – коэффициент усиления передающей и приемной антенн в направлении оси диаграммы направленности (ДН);  $V_{ef}$  – эффективный облучаемый объем

$$V_{ef} = \int_0^{\infty} \frac{dR}{R^2} \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi F_T^2(\theta, \varphi) F_R^2(\theta, \varphi), \quad (10)$$

$F_{T,R}(\theta, \varphi)$  – нормированная ДН передающей (приемной) антенн.

Для проведения измерений разработан двухчастотный бистатический когерентный радар, что позволяет сравнительно просто обеспечить высокое пространственное разрешение и уменьшить влияние переотражений от посторонних предметов. ДН передатчика  $T_x$  и приемника  $R_x$  (рис. 10) пересекаются под углом  $2\beta$ , формируя облучаемый объем  $V_{ef}$  (затененная область), где  $2L$  – расстояние между приемной и передающей антеннами,  $2\theta_0$  – ширина ДН,  $x_{T,R}, y_{T,R}, z_{T,R}$  – прямоугольные координаты в раскрыве передающей и приемной антенн соответственно.

Для одинаковых передающей и приемной антенн с гауссовой ДН [15]

$$F(x, y, z) = \exp \left\{ - \left( \frac{k\omega_0}{2} \right)^2 \frac{x^2 + y^2}{z^2} \right\}, \quad (11)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\omega_0$  – «радиус» пятна поля в раскрыве антенны.

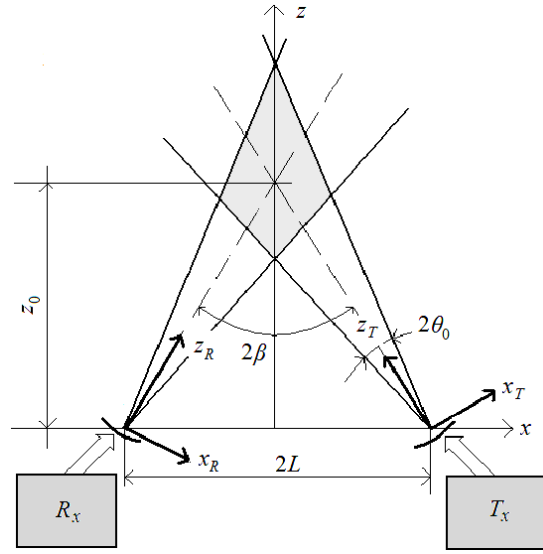


Рис. 10. Схема бистатического радара

Численный анализ выражений (10), (11) показывает, что распределение нормированной освещенности на оси облучаемого объема  $x = y = 0$  (рис. 11) несимметрично за счет вклада пространственного множителя  $R^{-2}$  в уравнение (10), а его максимум сдвигается в область  $z < z_0$

( $z_0 = \frac{L}{\text{tg } \beta} = 248,3\lambda$  – расстояние до точки пересечения осей ДН антенн (рис. 10);  $\omega_0 = 4,8\lambda$ ;  $L = 10,8\lambda$ ;  $\beta = 2,5^\circ$ ). При этом пространственное разрешение составляет  $\cong 0,4 z_0$ , а распределение освещенности в вертикальной плоскости мало отличается от ДН антенн, если расстояние между апертурами порядка размера раскрыва  $L \cong D_A$ .

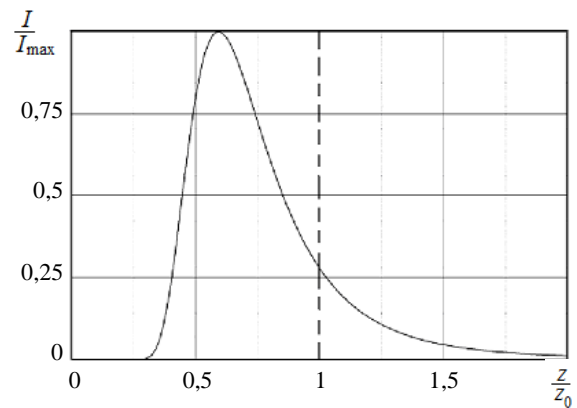


Рис. 11. Освещенность облучаемого объема

При выборе размеров антенн необходимо учитывать, что, с одной стороны, увеличение раскрыва ведет к увеличению отношения сигнал-шум, а с другой – к уменьшению облучаемого объема. Чтобы выяснить возможности улучшения

чувствительности радара, запишем отношение сигнал-шум, используя уравнение (9)

$$SNR = C_r D_A^4 z_0^{-1}(\beta) V_{ef}(\beta, D_A), \quad (12)$$

где константа  $C_r$  зависит от параметров радара и исследуемого аэрозоля.

На рис. 12 представлены результаты расчета зависимости приведенного отношения  $\overline{SNR} = \frac{SNR}{C_r}$  от радиуса «пятна» в раскрыве и угла сходимости ДН антенн с гауссовым распределением в раскрыве (обычно  $D_A \geq 2,6 \frac{\omega_0}{\lambda}$ ).

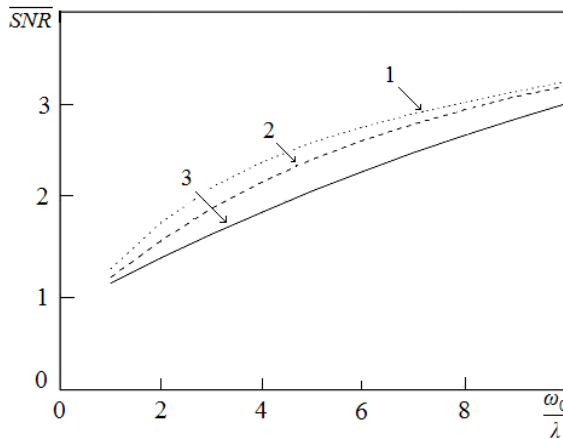


Рис. 12. Нормированное отношение сигнал-шум: 1 —  $\beta = 1,5^\circ$ ; 2 —  $\beta = 2,5^\circ$ ; 3 —  $\beta = 3,5^\circ$

Оказывается, при малых углах сходимости ДН антенн  $\beta \leq 5^\circ$ , отношение сигнал-шум медленно растет с увеличением раскрыва антенн и угла сходимости, что необходимо учитывать при разработке радара.

Разработанный двухчастотный радар работает в режиме непрерывного излучения и содержит 2 твердотельных приемо-передающих канала в диапазонах 3 и 8 мм. Оба канала построены по одинаковой схеме и реализуют принцип «плавающей» промежуточной частоты (ПЧ) [14] для компенсации независимых флуктуаций частоты передатчика и гетеродина. На рис. 13 приведена схема одного из частотных каналов, где в качестве задающего генератора (ЗГ) используется лавинно-пролетный диод (ЛПД), стабилизированный внешним высокочастотным резонатором. Мощность ЗГ через ферритовый вентиль (ФВ-1) и направленный ответвитель (НО-1) поступает на усилитель мощности (УМ) в виде схемы сложения на четырех ЛПД и затем излучается передающей антенной  $A_{Пер}$ . При этом часть мощности ЗГ через боковое плечо НО-1 ответвляется на смеситель опорного канала ( $СМ_{ок}$ ), на второй вход которого подается часть мощности гетеро-

дина (Гет). Гетеродин также выполнен на основе генератора на ЛПД, излучение которого стабилизировано внешним высокочастотным резонатором. Сигналы с выхода  $СМ_{ок}$  подаются на вход 3-каскадного усилителя промежуточной частоты (УПЧ) и далее на один из входов фазового детектора (ФД), причем для регулировки усиления между 1-м и 2-м каскадами УПЧ установлен электрически управляемый аттенуатор для ручной регулировки усиления (РРУ).

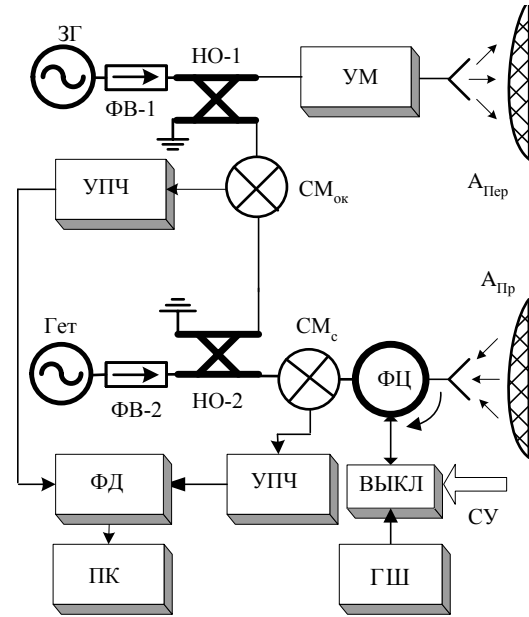


Рис. 13. Схема одного из каналов когерентного радара

На второй вход ФД подаются сигналы с выхода УПЧ, которые формируются на выходе смесителя  $СМ_c$  в результате смешения сигналов гетеродина и сигналов с выхода приемной антенны  $A_{Пр}$ . Таким образом, на выходе ФД формируется разностный сигнал, содержащий информацию о доплеровском спектре сигналов, отраженных от исследуемого объекта. Также, если средний квадрат флуктуации разности частот ЗГ и Гет

$$\delta_{\Delta\omega} = \left\{ \frac{1}{\tau_e} \int_0^{\tau_e} dt [\omega_T(t) - \omega_H(t)]^2 \right\}^{1/2} \quad \text{за время рас-}$$

пространения сигналов до объекта и обратно  $\tau_e$  существенно меньше доплеровского смещения частоты отраженного сигнала  $\delta_{\Delta\omega} \ll |\Omega_d|$ , ФД успешно подавляет взаимные уход частот используемых генераторов. При этом высокая кратковременная стабильность частоты обеспечивается за счет применения внешнего высокочастотного резонатора.

Сигнал с выхода ФД подается на персональный компьютер (ПК) для дальнейшей обработки, а для калибровки чувствительности радара

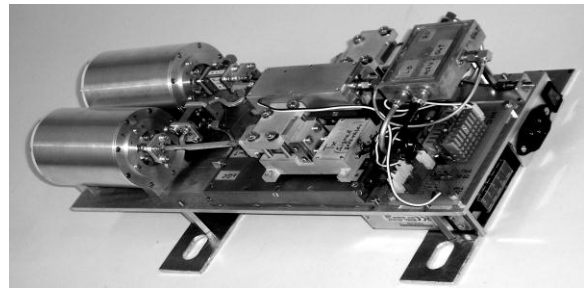
используется схема в приемном плече, содержащая ферритовый циркулятор (ФЦ), СВЧ-выключатель (ВЫКЛ) и генератор шума (ГШ). В режиме «Прием» СВЧ-выключатель находится в положении «Закрывается», в результате чего мощность принятого сигнала поступает на смеситель приемника  $СМ_c$  (ГШ выключен). В режиме «Калибровка» СВЧ-выключатель переводится в состояние «Открыто» и мощность с выхода ГШ поступает на вход приемника. При этом мощность шумов составляет 18 дБ относительно  $kT$  в диапазоне  $\lambda = 8$  мм и 12 дБ относительно  $kT$  в диапазоне  $\lambda = 3$  мм ( $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура).

Амплитудное распределение в раскрыве рупорно-линзовых антенн спадает на краю апертуры до  $-14$  дБ с целью уменьшения уровня боковых лепестков, а измеренные параметры радара сведены в табл. 1.

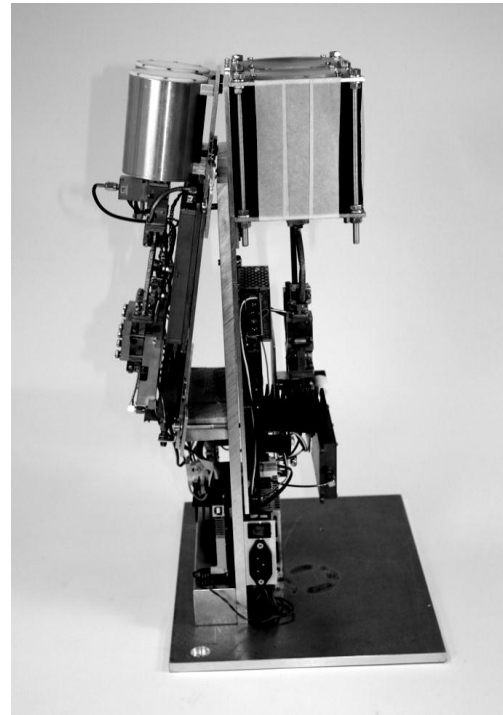
Таблица 1

Параметры двухчастотного радара

Параметр	Канал $\lambda_1$	Канал $\lambda_2$
Рабочая частота, ГГц	92,82	35,2
Излучаемая мощность, мВт	120	190
Частотный шум, дБ/Гц (расстройка 10 кГц)	-90	-110
Ширина ДН антенн, град	3,2	6,4
Боковое излучение, дБ	< -23	< -23
Шум-фактор приемника, дБ	10	8
Глубина РРУ, дБ	25	25
Значение ПЧ, ГГц	1,5	1,5
Усиление УПЧ, дБ	57	58
Полоса УПЧ, МГц	486	512
Полоса пропускания ФД, кГц	18	18
Частота дискретизации, кГц	44	44



а)



б)

Рис. 14. Общий вид: а) – 3-мм канала; б) – радара в сборе

Конструкция радара (рис. 14) позволяет сводить ДН приемной и передающей антенн в каждом частотном канале, а также сведение лучей частотных каналов.

Для проведения измерений использовался стенд [16], схема которого представлена на рис. 15. Вентилятор формирует воздушный поток, скорость которого составляет  $\cong 10$  м/с при диаметре воздуховода 300 мм. Исследуемые частицы вводятся в воздушный поток с помощью дозатора, который равномерно распределяет их по поперечному сечению воздуховода. Конструкция дозатора обеспечивает практическую линейную зависимость интенсивности потока частиц  $I$  (г/мин) от нормированной скорости подачи песка (рис. 16), исключая область малых интенсивностей, где расход частиц соизмерим со скоростью их поступления в воздуховод.

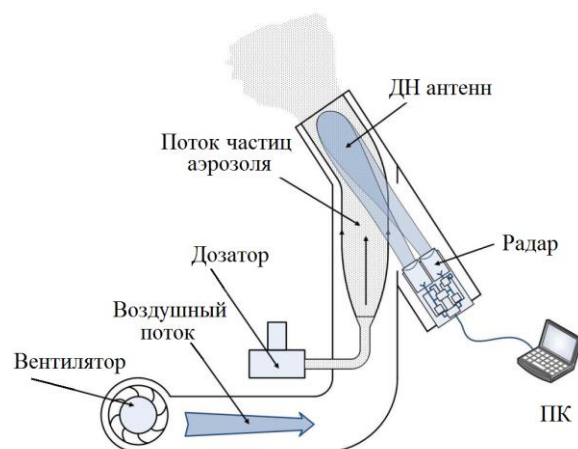


Рис. 15. Схема измерительного стенда



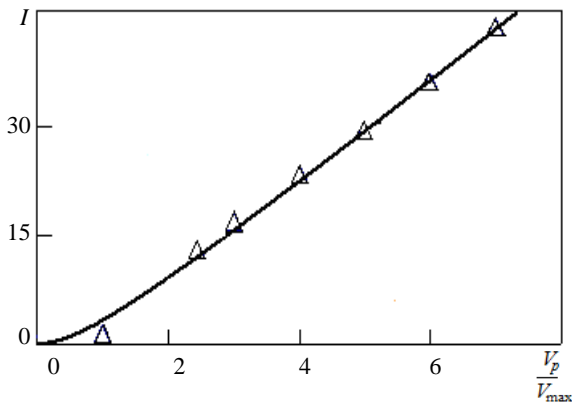


Рис. 16. Характеристика производительности дозатора

При этом удельная масса (*mass-loading* [12, 13])  $M_L$  (г/м<sup>3</sup>) вычисляется по известной скорости потока  $V_p$  (м/с) и поперечному сечению воздуховода  $S_c$  (м<sup>2</sup>) в виде

$$M_L = \frac{I}{60 S_c V_p}. \quad (13)$$

В связи с трудностями формирования аэрозоля с заданным законом распределения частиц по размерам, в рассматриваемом случае поток аэрозолей моделировался с помощью калиброванных частиц морского песка размерами  $2r \cong (1 \pm 0,15)$  мм.

Для калибровки частиц методом «просеивания» были изготовлены две фильеры с отверстиями диаметром  $2r_1 = 1,0$  мм и  $2r_2 = 1,3$  мм, но из-за естественных причин форма частиц оказалась далека от сферической (рис. 17).

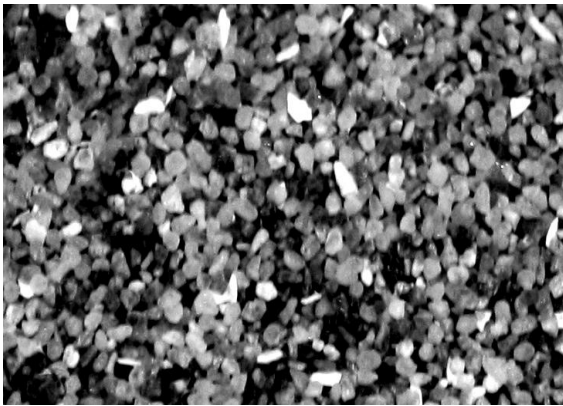


Рис. 17. Вид исследуемых частиц

Чтобы оценить влияние отличия формы частиц от сферической, измерялся среднекубический радиус  $r_{ск} = \sqrt[3]{\frac{3V_{ж}}{4\pi N_{п}}}$ , который определялся путем измерения объема вытесненной жидкости  $V_{ж}$  при погружении партии из  $N_{п} = 2 \cdot 100$  ча-

стиц. Как оказалось, среднекубический диаметр частиц равен  $2r_{\text{н\acute{e}}} = 0,96$  мм, что мало отличается от диаметра минимального отверстия фильеры  $2r_1 = 1,0$  мм.

Кроме того, взвешивание партии частиц позволило определить их плотность  $\rho_V = 2,65$  г/см<sup>3</sup>, которая соответствует области значений для кварца, гранита и ракушечника ( $\rho = 2,4 \div 2,8$  г/см<sup>3</sup>,  $\epsilon \cong 3,75 - j 0,001$ ).

На выходе каждого из каналов вычислялось значение спектральной плотности мощности (СПМ), усредненной по ансамблю из  $M$  реализаций для получения статистически устойчивой спектральной оценки сигналов  $U(t)$ , отраженных от аэрозолей:

$$\langle S_p(\Omega) \rangle = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M S_m(\Omega), \quad (14)$$

где  $S_m(\Omega)$  – квадрат модуля дискретного преобразования Фурье (ДПФ) на  $m$ -м интервале  $I_m = (m-1) \text{Int}[T_s(\Delta t)^{-1}]$ ;  $m \in (1, M)$ ;  $M = \text{Int}[T_0 T_s^{-1}]$ ;  $T_0$  – длительность реализации отраженных сигналов;  $T_s$  – длительность интервала, на котором вычисляется ДПФ

$$S_m(\Omega) = \frac{S_0}{T_s} \left| \Delta t \sum_{i=I_m}^{I_{m+1}} U(t_i) e^{-j\Omega t_i} \right|^2. \quad (15)$$

Разработанный измерительный стенд испытывался с разными образцами аэрозолей, в частности, на рис. 18 приведен пример для сигналов, отраженных от монодисперсного потока частиц корунда, среднеквадратичный диаметр которых составляет 5 мкм ( $\lambda = 3$  мм).

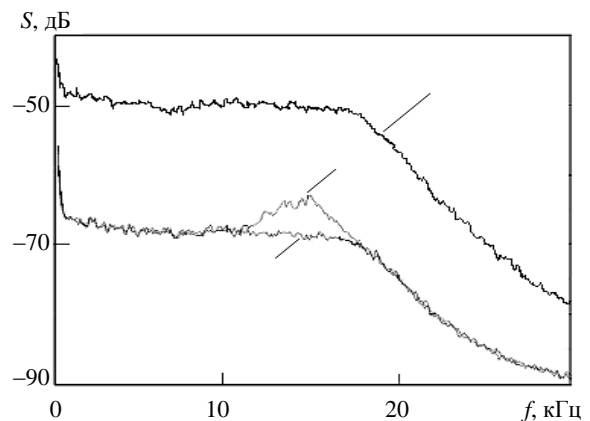


Рис. 18. Пример спектра сигналов, отраженных от частиц аэрозоля диаметром 5 мкм

На рис. 18 кривая 1 соответствует калибровочному сигналу с выхода ГШ (12 дБ относительно  $kT$ ), кривая 2 – сигналу, отраженному от частиц корунда; а кривая 3 – шумам приемника.

**3. Результаты эксперимента.** Описанный выше измерительный стенд использовался для двухчастотного зондирования модели полидисперсной среды в виде частиц морского песка со сравнительно «узким» законом распределения  $\Delta\bar{r} \leq 0,2$ . Измерения проводились для трех значений интенсивности потока частиц  $I_1 = 12,7$  г/мин,  $I_2 = 23$  г/мин и  $I_3 = 35,5$  г/мин, которые соответствуют удельной массе (*mass-loading*)  $M_{L_1} = 0,3$  г/м<sup>3</sup>,  $M_{L_2} = 0,54$  г/м<sup>3</sup> и  $M_{L_3} = 0,84$  г/м<sup>3</sup> (9).

На рис. 19 приведен пример временной структуры отраженного сигнала, которая имеет шумоподобный характер ( $\lambda = 3$  мм – рис. 19, а,  $\lambda = 8$  мм – рис. 19, б) и соответствующую ему СПМ (рис. 20, а –  $\lambda = 3$  мм, рис. 20, б –  $\lambda = 8$  мм,  $M = 256$ ). Следует отметить, что ширина приведенных СПМ позволяет отнести сигналы, отраженные от потока аэрозолей, к классу сверхширокополосных –  $\Delta f \cong f_0$ . Это говорит не столько о различных размерах частиц, сколько о турбулентном характере воздушного потока в воздуховоде.

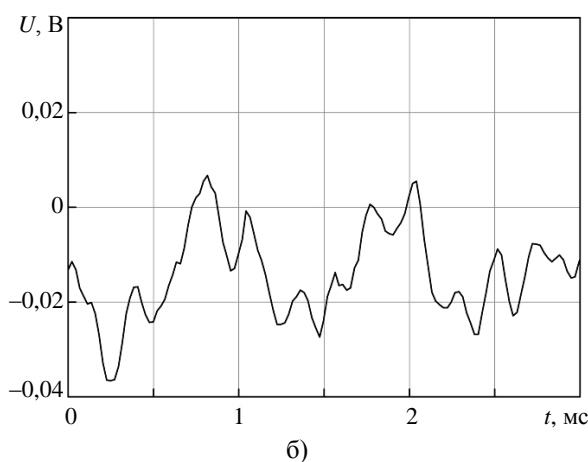
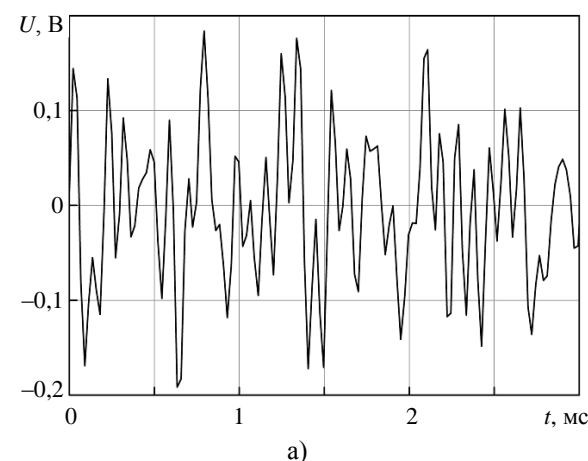


Рис. 19. Временная структура отраженного сигнала в диапазонах: а) – 3 мм; б) – 8 мм

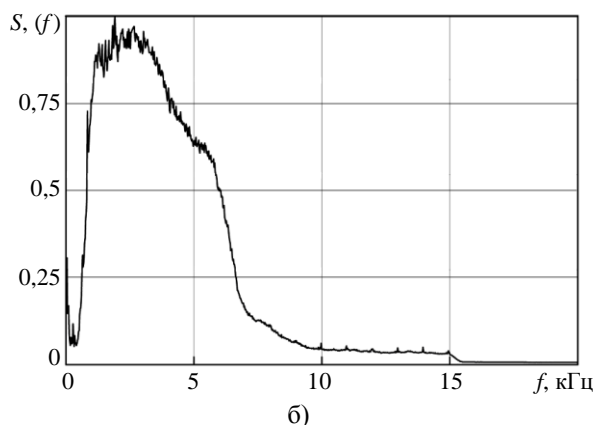
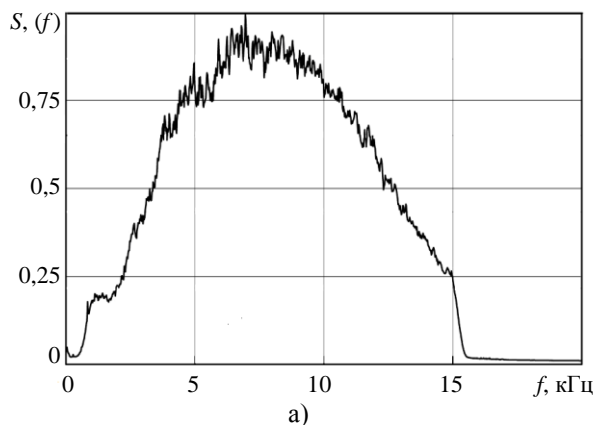


Рис. 20. Спектр отраженных сигналов в диапазонах: а) – 3 мм; б) – 8 мм

Измеренные значения СПМ использовались для вычисления отраженной мощности в выражении удельной ЭПР (9)

$$P_R = \int_0^{\Omega_{\max}} d\Omega S_P(\Omega), \quad (16)$$

где  $\Omega_{\max}$  – полоса пропускания доплеровского фильтра на выходе ФД (рис. 13). При этом амплитуда СПМ  $S_0$  (15) измерялась путем калибровки чувствительности приемного устройства с помощью ГШ (рис. 13), излучаемая мощность  $P_T$  и коэффициент усиления антенн  $G_{0R} = G_{0T}$  измерялись в ходе тестирования. Расстояние до пересечения осей ДН (рис. 10) составляет  $z_0 = 2,05$  м для канала  $\lambda_1 = 3,23$  мм и  $z_0 = 20,05$  м для  $\lambda_2 = 8,5$  мм соответственно, а эффективное значение рассеивающего объема  $V_{ef}$  численно оценивалось по измеренным ДН антенн согласно выражению (10).

В результате проведенных измерений полученные данные сведены в табл. 2 для трех режимов дозатора, отличающихся интенсивностью потока частиц (рис. 16), где в скобках указаны теоретические расчеты соответствующих величин.

Таблица 2  
Результаты измерений

Параметр	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Интенсивность потока, г/мин	12,7	23,0	35,5
Удельная масса частиц, г/м <sup>3</sup>	0,344 (0,3)	0,562 (0,54)	0,875 (0,84)
ДЭПР, дБ	13,4 (14,976)	13,48 (14,976)	13,48 (14,976)
Эффективное значение моды, $r_{mod}^{ef}$ , мм	0,55 (0,48)	0,547 (0,48)	0,547 (0,48)
Концентрация частиц, м <sup>-3</sup>	186 (245)	309 (440)	482 (685)

Как видно, экспериментальные данные отличаются хорошей повторяемостью  $\leq 1\%$ , несмотря на существенно разную интенсивность потока  $\frac{I_{max}}{I_{min}} \cong 3$ , и соответствуют несколько завышенной оценке для диаметра частиц и удельной массы на  $\leq 10\%$ , а для концентрации частиц – на  $25\%$ .

**Выводы.** В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– полидисперсный характер аэрозоля приводит к существенному сглаживанию зависимости ЭПР от размеров частиц, практически полностью устраняя резонансные явления;

– применение двухчастотного метода зондирования позволяет с удовлетворительной точностью оценивать характеристики полидисперсной среды в случае узкого  $\Delta\bar{r} \leq 0,3$  и широкого распределений  $\Delta\bar{r} \geq 4$  частиц по размерам;

– проведенное экспериментальное исследование модели аэрозоля в виде калиброванных частиц песка подтвердило возможность получения удовлетворительных оценок основных параметров потока аэрозоля для случая узкого распределения частиц.

1. *Particulate Air Pollution and Acute Health Effects* / A. Seaton, D. Godden, W. Macnee et al. – Lancet, 1995. – 345 p.
2. *EU 2001b. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of certain pollutants into the air from large combustion plants* // Official Journal of the European Communities. – 2001. – L 309. – P. 22–30.
3. *Wilson J. C. Aerodynamic particle size measurement by Laser-Doppler velocimetry* / J. C. Wilson, D. Y. H. Liu // Journal Aerosols Science. – 1980. – N 11. – P. 139–150.
4. *Hillamo R. E. On the performance of the Berner Low Pressure Impactor* / R. E. Hillamo, E. I. Kaupinen // Aerosols Science and Technology. – 1991. – N 14. – P. 33–47.
5. *Bond T. C. Calibration and Intercomparison of Filter-Based Measurements of Visible Light Absorption by Aerosols* / T. C. Bond, T. L. Anderson, D. Campbell // Aerosols Science and Technology. – 1999. – N 30. – P. 582–600.
6. *Абшаев М. Т. О возможностях микроструктурных исследований облаков и осадков радиолокационными методами* / М. Т. Абшаев, Ю. А. Дадали // Тр. Высокогор. геофиз. ин-та. – 1966. – № 5. – С. 71–85.

7. *Войтович О. А. Исследование двухчастотного метода дистанционного зондирования твердых аэрозолей* / О. А. Войтович, А. М. Линкова, Г. И. Хлопов // Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2009. – 14, № 2. – С. 169–176.
8. *Айвазян Г. М. Распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн в облаках* / Г. М. Айвазян. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 480 с.
9. *Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения.* – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 510 с.
10. *Ван-де-Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами* / Г. Ван-де-Хюлст. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 536 с.
11. *Wiscombe W. J. Improved Mie scattering algorithms* / W. J. Wiscombe // Appl. Optics. – 1980. – 19, N 9. – P. 1505–1509.
12. *Goldhrish J. Attenuation and Backscatter from a Derived Two-dimensional Duststorm Model* / J. Goldhrish // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 2001. – 49, N 12. – P. 1703–1711.
13. *Арсеньян Е. И. Затухание ультракоротких радиоволн в песчано-пылевом аэрозоле* / Е. И. Арсеньян, А. А. Семенов // Зарубеж. радиоэлектрон. – 1995. – № 1. – С. 16–26.
14. *Радиолокационные устройства и системы: справ. по радиолокации: в 4 т. Т. 3.* / пер. с англ. под ред. К. Н. Трофимова, под ред. А. С. Вирницкого. – М.: Сов. радио, 1978. – 528 с.
15. *Tepljuk A. Millimeter wave coherent radar with high spatial resolution for the determination of water content in aerosols* / A. Tepljuk, R. Knoechel, G. Khlopov // Proc. of the European Microwave Association. – 2008 – 4. – P. 12–17.
16. *Radar measurement of mass loading of small volume scatterers* / A. Tepljuk, R. Knoechel, G. Khlopov, K. Schuenemann // Proc. of German Microwave Conference GeMiC 2008. – Hamburg, 2008. – P. 408–411.

## DOUBLE FREQUENCY SOUNDING OF THE POLYDISPERSE SOLID AEROSOLS

R. Knoechel, A. M. Linkova, A. L. Tepljuk,  
G. I. Khlopov, K. Schuenemann

Double frequency method for the remote sensing of the polydisperse solid aerosols is considered for measurement of particle dimensions. Results of the numerical simulation based on the rigorous solution of the diffraction problem are given, which allow to estimate limits of the method applicability and influence of the medium polydispersity. Results of the development of measuring bench and model data of the solid aerosols by the instrumentality of calibrated particles of beach sand are also given.

**Key words:** remote sensing, radar, radar cross section, differential radar cross section.

## ДВОЧАСТОТНЕ ЗОНДУВАННЯ ПОЛІДИСПЕРСНИХ ТВЕРДИХ АЕРОЗОЛІВ

Р. Кньохель, А. М. Лінкова, О. Л. Теплюк,  
Г. І. Хлопов, К. Шенеманн

Розглядається метод двочастотного дистанційного зондування полідисперсного потоку частинок твердих аерозолів для оцінки їх розмірів. Наведено результати чисельного моделювання, що дозволяє оцінити межі застосованості методу та вплив полідисперсності розсіювального середовища. Подано результати розробки вимірювального стенду та дані моделювання твердих аерозолів за допомогою каліброваних частинок морського піску.

**Ключові слова:** дистанційне зондування, радар, ефективна поверхня розсіяння, диференційна ефективна поверхня розсіяння.

Рукопись поступила 14 октября 2009 г.