

В. П. Душенко, И. М. Кучерук, А. Ф. Булындра

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
НЕКОТОРЫХ КАПИЛЛЯРНОПОРИСТЫХ ТЕЛ В ИК ОБЛАСТИ ДЛИН
ВОЛН λ - 5 МММ

Для выбора оптимальной области спектра при термической обработке влажных дисперсных материалов требуется знание спектральных характеристик ИК источников излучения и оптических свойств дисперсных материалов в ИК области спектра $[\lambda - \nu]$.

Большинство дисперсных материалов сильно рассеивает излучение диффузно и почти непрозрачно даже при малых толщинах, поэтому определяющей спектротрической характеристикой их есть спектры диффузного отражения.

Спектры диффузного отражения дисперсных материалов в большинстве случаев близки к спектрам пропускания тех же материалов в опловном состоянии. Спектральная отражательная способность дисперсных материалов зависит от степени их дисперсности, ориентации частиц, толщины слоя материала, а также дисперсионной среды и коэффициентов поглощения компонентов системы [4, 5]. Для рационального выбора типа ИК источника важным является знание спектральных коэффициентов отражения дисперсных материалов при различных влагосодержаниях (хотя бы для максимально увлажненного и воздушно-сухого состояний материалов).

Нами исследовались спектральные характеристики модельных капиллярнопористых материалов: речной белый кварцевый песок дисперсности $0 < d \leq 0,25$; $0,25 < d \leq 0,5$; $0,5 < d \leq 1,0$ мм и однороднопористый силикагель КСК-5 дисперсности $0 < d \leq 0,25$; $0,25 < d \leq 0,5$ мм при максимальном увлажнении и для воздушно-сухого состояния при $\psi = 0,6$ и температуре $T = 293^\circ\text{K}$.

Величины отражательной способности кварцевого песка приведены в работах [6 - 9], где, к сожалению, не указаны степень дисперсности и влагосодержание материала.

Определение абсолютных спектральных коэффициентов диффузного отражения проводилось методом зеркальной полусферы

[6, 10-12] с использованием спектрометра ИКС-12.

Для более точного определения поправок, учитывающих уход отраженных поверхностей материала лучей через входное отверстие полушеры и экранирующее действие оправы радиационного термоэлемента, а также установления характера отражения поверхности данного материала исследовалось пространственное распределение отраженной радиации с помощью приставки ИПО-12 к ИКС-12.

Определение спектральных коэффициентов отражения проводилось по точкам через 0,1 мкм при различных раскрытиях щели монохроматора, что обеспечивало сведения к минимуму инерционности регистрирующей системы и повышало точность измерений. Для достижения линейности фотозлектрооптического усилителя ФЭОУ-10 перед каждым измерением устанавливалось "в левое" положение границы света и тени строго по середине решеток второго каскада усилителя спектрометра.

Исследуемые образцы помещались в кювету глубиной 10 мм, что исключало ошибки, связанные с толщиной слоя материала (проникшее излучение полностью поглощалось материалом), а не приводило к существенному изменению влагосодержания во время опыта.

Спектры пропускания исследовались на ИКС-14.

Исследование спектральных характеристик "светлых" ИК источников проведено в интервале длин волн 0,7-2,6 мкм, "темных" - 1,5 - 15,5 мкм. Излучение нагревательного элемента "светлых" ИК источников пропускается их стеклянными баллонами до 2,5 мкм. Излучение "темных" ИК источников сильно поглощается водяными парами и углекислым газом атмосферы в интервалах длин волн примерно 2,5-3,5; 4-8; 9-10; 13-15 мкм [13]. Установлено, что примерно 90% регистрируемой спектрометром ИКС-12 энергии для "светлых" ИК источника приходится на интервалы длин волн 1-2 мкм и для "темных" - 1,5-5,5 мкм. Поэтому существенный интерес представляет исследование оптических свойств дисперсных материалов, подвергшихся термообработке ИК излучениями, в интервале длин волн 1-5 мкм.

Из рис. 1 видно, что спектральные коэффициенты отражения с увеличением дисперсности увеличиваются. Это объясняется тем, что при небольших размерах частиц лучи испытывают очень сильно диффузное отражение уже в верхних слоях материала, и отраженный поток выходит наружу, проходя при этом через очень малые частицы не сильно ослабленный. При увеличении размера частиц коэффициенты диффузного отражения уменьшаются вследствие того, что излучение, проникшее в поры материала, после диффузного рассеивания проходит больший путь в самих частицах, ослабляется при этом сильнее. Минимум отражения на кривых $\rho_{\lambda} = f(\lambda)$, приходящийся примерно на 3,0 мкм для воздушно сухого песка, связан с наличием влаги в нем, для которой основная валентная полоса, соответствующая колебаниям группы OH, приходится на $\lambda = 2,92$ мкм. Ввиду значительной полярности молекул воды поглощения ее в этой полосе велико.

Отмеченные выше тенденции зависимостей $\rho_{\lambda} = f(\lambda)$ укладываются опытные данные М.А. Кротопкина и Б.И. Козирева, полученные для песка темно-желтого цвета со средним размером частиц $I = 1,5$ мм [14, 15]. При максимальной влажности спектры спектральные коэффициенты диффузного отражения кварцевого песка уменьшаются и становятся соизмеримы с коэффициентом отражения воды, начиная с длин волн $\lambda \geq 1,5$ мкм [16]. Это свидетельствует о том, что отражение ИК лучей при этом в основном определяется водой, для которой поглощение в этой области очень сильное.

Уменьшение ρ_{λ} для силиката КСМ-5 по сравнению с кварцевым песком той же дисперсности следует связывать с поглощением ИК излучения, обусловленным сильно развитой внутризерновой пористостью силиката.

В воздушно сухом силикате содержится больше влаги ($\bar{u} = 30,4\%$) по сравнению с кварцевым песком той же дисперсности, что приводит к появлению на кривой $\rho_{\lambda} = f(\lambda)$ дополнительных полос минимумов отражения в области $\lambda = 1,5$ и 2,0 мкм (см. рис. 1, б), которые соответствуют полосам поглощения в спектре пропускания воды.

При исследовании спектров пропускания установлено, что кварцевый песок фракции $0,5 \leq d \leq 1,0$ мм толщиной слоя $l = 1,03$ мм в воздушно-сухом состоянии и при $\bar{u} = 17,3\%$, в таком песок фракции $0 < d \leq 0,25$ мм при $l = 0,508$ мм в воздушно-сухом состоянии не пропускает излучения в области I - 5 мкм. Для кварцевого песка фракции $0 < d \leq 0,25$ мм при $l = 0,25$ мм и $\bar{u} = 7\%$, в такой фракции $0,25 \leq d \leq 0,5$ мм при $l = 0,508$ мм в воздушно-сухом состоянии и при $\bar{u} = 21\%$ в области I - 2,5 мкм спектральный коэффициент пропускания $\tau_\lambda = 1,5-3\%$. Коэффициент максимально увлажненного силикагеля при уменьшении степени дисперсности увеличивается. Это объясняется тем, что при больших размерах частиц влагоемкость силикагеля больше, и пропускание при этом определяется межзерновой влагой, для которой τ_λ больше, чем материала частиц.

Из рис. 1, б видно, что для силикагеля степени дисперсности $0,25 \leq d \leq 0,5$ мм при толщине слоя $l = 0,508$ мм и $\bar{u} = 118\%$ вид кривой $\tau(\lambda)$ аналогичен кривой $\tau(\lambda)$ для воды. Это говорит о доминирующей роли воды при пропускании ИК излучения через максимально увлажненные силикагели в области I - 2,5 мкм.

Пространственное распределение отрезанной радиации измерялось при угле падения 10° в области 0,9 - 2,5, 1,6 - 5,3 мкм и отдельно для длин волны 1,3 и 3,0 мкм. Это обусловлено распределением энергии в спектре излучения "светлых" и "темных" ИК по эволюции, а также тем, что максимум спектральной интенсивности величины излучения примерно приходится соответственно на 1,3 и 3,0 мкм. Выбор угла падения излучения в 10° связан с конструктивными особенностями приставки ИПО-12. Угол падения в 10° обычно используется для подобных исследований в других авторами [17].

Из рис. 2 видно, что пространственное распределение отрезанного излучения воздушно-сухим кварцевым песком дисперсности $0 < d \leq 0,25$ мм с точностью $\pm 10\%$ подчиняется закону косинусов в областях 0,9 - 2,5 и 1,6 - 5,0 мкм. Для других фракций кварцевого песка и силикагеля ИСН-5 в воздушно-сухих состояниях это распределение имеет диффузный характер.

Характер пространственного распределения отраженной радиации указывает на необходимость применения отражений в суммированных установках с большими коэффициентами отражения, что обеспечит более эффективное использование ИК излучения.

В табл. 1 и 2 приведены ориентальные коэффициенты ослабления, рассчитанные по формуле (1) на основе опытных данных, полученных с помощью ИЭС-12:

$$K_{\lambda} = \frac{1}{l_2 - l_1} \ln \frac{l_{12}}{l_{21}} \quad (1)$$

Для аналитического описания внутреннего тепло- и массообмена в дисперсных средах под воздействием ИК излучения необходимо знать коэффициенты ослабления в интервалах эффективного излучения ИК источников, которые в предположении, что коэффициенты отражения ИК лучей поверхности материалов различной толщины одинаковы, могут быть рассчитаны по формуле

$$K = \frac{1}{l_2 - l_1} \ln \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} l_1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} l_2(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

Вместо интегрирования с микроэлементом [18], приближенно можно

$$K = \frac{1}{l_2 - l_1} \ln \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} l_1(\lambda) \Delta \lambda}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} l_2(\lambda) \Delta \lambda} \quad (3)$$

Для последующих материалов путем графического интегрирования получены эмпирические коэффициенты ослабления в областях 0,9-2,5, 1,6-5,0 мкм, которые приведены в табл. 3.

Зная спектральные коэффициенты отражения для непрозрачных тел, легко определить ориентальную излучательную способность их при данной температуре:

$$\epsilon_{\lambda T} = 1 - \rho_{\lambda T} \quad (4)$$

Таблица I

Влажность K_A для воздушно-сухого кварцевого песка различных фракций

λ , мм	K_A , см^{-1} для $0 < d \leq 0,25$ мм		K_A , см^{-1} для $0,25 < d \leq 0,5$ мм		K_A , см^{-1} для $0,5 < d \leq 1,0$ мм		λ , мм	K_A , см^{-1} для $0 < d \leq 0,25$ мм		K_A , см^{-1} для $0,25 < d \leq 0,5$ мм		K_A , см^{-1} для $0,5 < d \leq 1,0$ мм	
	K_A , см^{-1}	для $0 < d \leq 0,25$ мм	K_A , см^{-1}	для $0,25 < d \leq 0,5$ мм	K_A , см^{-1}	для $0,5 < d \leq 1,0$ мм		K_A , см^{-1}	для $0 < d \leq 0,25$ мм	K_A , см^{-1}	для $0,25 < d \leq 0,5$ мм	K_A , см^{-1}	для $0,5 < d \leq 1,0$ мм
1,0	7,1		9,4		10,2		3,1	5,2		26,0		16,6	
1,1	7,1		4,1		17,6		3,2	9,1		20,9		17,4	
1,2	4,4		5,2		13,8		3,3	6,5		16,6		12,4	
1,3	5,2		5,2		9,8		3,4	5,2		15,7		10,1	
1,4	5,8		5,2		9,6		3,5	6,7		15,0		7,0	
1,5	4,1		4,9		10,3		3,6	7,2		16,6		7,0	
1,6	4,8	0	5,0		10,1		3,7	5,7		15,2		5,2	
1,7	5,7		5,2		10,1		3,8	5,2		15,3		4,3	
1,8	5,2		5,2		10,1		3,9	5,7		14,6		2,7	
1,9	7,2		4,9		8,6		4,0	4,9		16,6		3,9	
2,0	5,2		7,1		8,3		4,1	6,7		19,0		4,4	
2,1	6,0		4,7		10,6		4,2	3,9		21,8		8,1	
2,2	5,8		6,2		10,6		4,3	5,7		18,2		4,4	
2,3	3,0		3,7		11,4		4,4	3,6		27,6		8,1	
2,4	7,0		3,8		16,2		4,5	5,7		27,6		5,7	
2,5	8,1		9,4		15,7		4,6	5,7		21,8		13,1	
2,6	7,1		12,5		8,7		4,7	8,1		13,8		21,9	
2,7	9,4	0	24,0		9,1		4,8	5,7		13,8		-	
2,8	9,4		30,7		13,0		4,9	-		-		-	
2,9	5,7		40,2		13,8		5,0	-		-		-	
3,0	8,1		30,8		9,4		-	-		-		-	

Таблица 2

Значение K_A для кварцевого песка и силикатогеля КСМ-5 различных фракций и в водосодержаний

λ , мм	Кварцевый песок			Силикатогель КСМ-5			
	$K_A, \text{см}^{-1}$ для $0 < d \leq 0,25$ мм $\bar{U} = 24\%$	$K_A, \text{см}^{-1}$ для $0,25 < d \leq 0,5$ $\bar{U} = 21\%$	$K_A, \text{см}^{-1}$ для $0,5 < d \leq 1,0$ мм $\bar{U} = 17,3\%$	$K_A, \text{см}^{-1}$ для $0 < d \leq 0,25$ мм $\bar{U} = 30,4\%$	$K_A, \text{см}^{-1}$ для $0,25 < d \leq 0,5$ мм $\bar{U} = 30,4\%$	$K_A, \text{см}^{-1}$ для $0 < d \leq 0,25$ мм $\bar{U} = 106\%$	$K_A, \text{см}^{-1}$ для $0,25 < d \leq 0,5$ мм $\bar{U} = 118\%$
1,0	9,4	12,8	1,3	11,3	2,4	15,8	14,6
1,1	6,1	10,6	1,3	13,4	4,3	19,0	15,3
1,2	8,8	9,4	2,2	19,7	3,8	19,9	17,5
1,3	10,1	11,7	3,2	27,0	3,9	28,6	27,6
1,4	10,6	13,8	6,7	32,0	4,1	21,0	36,6
1,5	9,4	10,6	3,6	27,0	3,8	23,3	26,8
1,6	9,6	6,2	3,6	25,7	5,5	20,8	26,6
1,7	11,4	14,8	0,9	31,0	5,7	23,3	31,3
1,8	25,0	17,4	0,8	39,4	5,7	34,1	38,9
1,9	23,8	19,1	0,9	48,8	6,7	67,5	27,6
2,0	11,6	14,8	5,4	39,7	7,2	42,6	40,2
2,1	14,8	12,8	5,2	3,8	10,0	45,5	43,9
2,2	23,8	18,2	5,2	54,0	9,4	62,2	-
2,3	-	20,5	19,4	54,0	9,4	-	-
2,4	-	21,8	-	-	-	-	-
2,5	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 3

Значение K для кварцевого песка и силикатогеля КСМ-5 различных фракций и водосодержаний в интервалах длин волн 0,9-2,5 мкм (K_1) 1,6 - 5,0 мкм (K_2)

	Кварцевый песок						Силикатогель КСМ-5			
	$0 < d \leq 0,25$	$0,25 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1,0$	$0 < d \leq 0,25$ $\bar{U} = 24\%$	$0,25 < d \leq 0,5$ $\bar{U} = 21\%$	$0,5 < d \leq 1,0$ $\bar{U} = 17,3\%$	$0 < d \leq 0,25$ $\bar{U} = 30,4\%$	$0,25 < d \leq 0,5$ $\bar{U} = 30,4\%$	$0 < d \leq 0,25$ $\bar{U} = 106\%$	$0,25 < d \leq 0,5$ $\bar{U} = 118\%$
$K_1, \text{см}^{-1}$	6,5	4,5	11,2	10,6	3,6	6,7	27,0	6,0	24,4	21,1
$K_2, \text{см}^{-1}$	8,3	9,6	7,4	-	-	-	-	-	-	-

Интегральная излучательная способность для непрозрачных тел в данном интервале длин волн может быть определена так [18]

$$\epsilon_T = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - \rho_{\lambda T}) I_{0T}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{0T}(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

или

$$\epsilon_T \approx \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - \rho_{\lambda T}) I_{0T}(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{0T}(\lambda) \Delta\lambda} \quad (6)$$

о б о з н а ч е н и я

d - размер частиц; φ - относительная влажность воздуха; ρ_{λ} - спектральный коэффициент диффузного отражения; \bar{u} - интегральное влагосодержание; l - толщина слоя; τ_{λ} - спектральный коэффициент пропускания; K_{λ} - спектральный коэффициент ослабления; I_{λ} , $I_{\lambda 2}$ - соответственно интенсивность монохроматического излучения, прошедшего через слой материала, толщиной l ; $I_{\lambda} = I_{\lambda 2}$; $I_{0T}(\lambda)$ - интенсивность монохроматического излучения для длины волны; λ - абсолютно черного тела при температуре T ; $\epsilon_{\lambda T}$ - спектральная излучательная способность реального тела; ϵ_T - интегральная излучательная способность реального тела.

Л и т е р а т у р а

1. Дерибере М. Практическое применение инфракрасных лучей. Госэнергоиздат, 1959.
2. Борхерт Р., Юниц В. Техника инфракрасного нагрева. Госэнергоиздат, 1963.
3. Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. "Пищевая промышленность", 1966.
4. Гарин О.П., Степанов П.М. ИЭТФ, 27, 4 (10), 567, 1954.
5. Андюков В.В. ИЭТФ, 27, 4 (10), 458, 1954.

6. Collintz W.W. Bull. Bur. Stand., 9, 283, 1913.
7. Hulbert E.O. Journ. Opt. Soc. Amer., 17, 23, 1928.
8. Лефлянд В.Г. ИЭТФ, 4, 8, 1934.
9. Кропоткин М.А., Козырев Б.П. Оптика и спектроскопия, 17, 2, 259, 1964.
10. Royds T. Phys. Zs. 815, 316 April 1910.
11. Sanderson I.A. Journ. Opt. Soc. Amer., 42, 263, 1952.
12. Козырев Б.П., Вершин О.Б. Оптика и спектроскопия, 4, 1959.
13. Хекфорд Г.Л. Инфракрасное излучение. М.-Л., "Энергия", 1964.
14. Кропоткин М.А., Козырев Б.П. ИФЖ, 7, № 9, 108, 1964.
15. Кропоткин М.А., Козырев Б.П. Изв. вузов - Физика, № 3, 27, 1965.
16. Киселовский Л.Д. Оптика и спектроскопия, 7, 3, 311, 1959.
17. Biebet W, Zusammensetzung der von Werk- und Baustoffen zurückgeworfener Wärmestrahlung, Zs. f. techn. Physik, 6, 130, 1941
18. Рабинович Г.Д. ИФЖ, 4, № 9, 1962.

Киевский педагогический институт
им. А.М. Горького

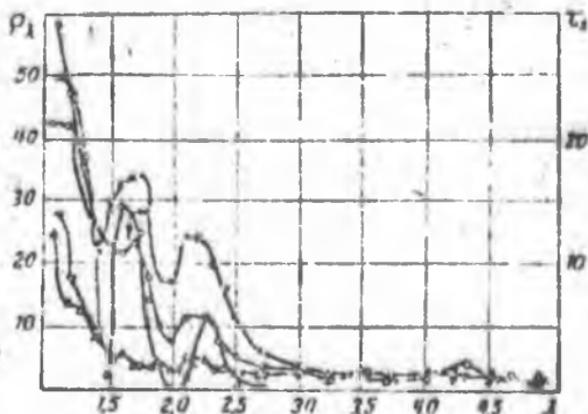
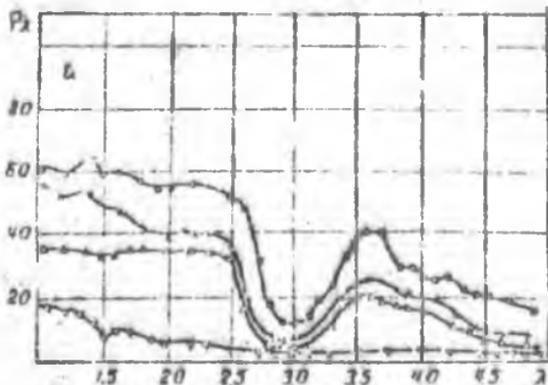


Рис. 1. Спектральные коэффициенты диффузного отражения и пропускания кварцевого песка и силикагеля КСМ-5:

а - кварцевый песок, воздушно-сухой, дисперсности: 1 - $0 < d \leq 0,25$ мкм; 2 - $0,25 \leq d \leq 0,5$ мкм; 3 - $0,5 \leq d \leq 1,0$ мкм; 4 - $0 < d \leq 0,25$ мкм при $\bar{U} = 24\%$;

б - силикагель КСМ-5 дисперсности: 1 - $0,25 \leq d \leq 0,5$ мкм при $\bar{U} = 30,4\%$; 2 - $0 < d \leq 0,25$ мкм при $\bar{U} = 30,4\%$; 3 - $0,25 \leq d \leq 0,5$ мкм при $\bar{U} = 118\%$; 4 - $0 < d \leq 0,25$ мкм при $\bar{U} = 106\%$; 5 - спектральные коэффициенты пропускания силикагеля КСМ-5 дисперсности $0,25 \leq d \leq 0,5$ мкм при $\bar{U} = 0,508$ нм, $\bar{U} = 118\%$

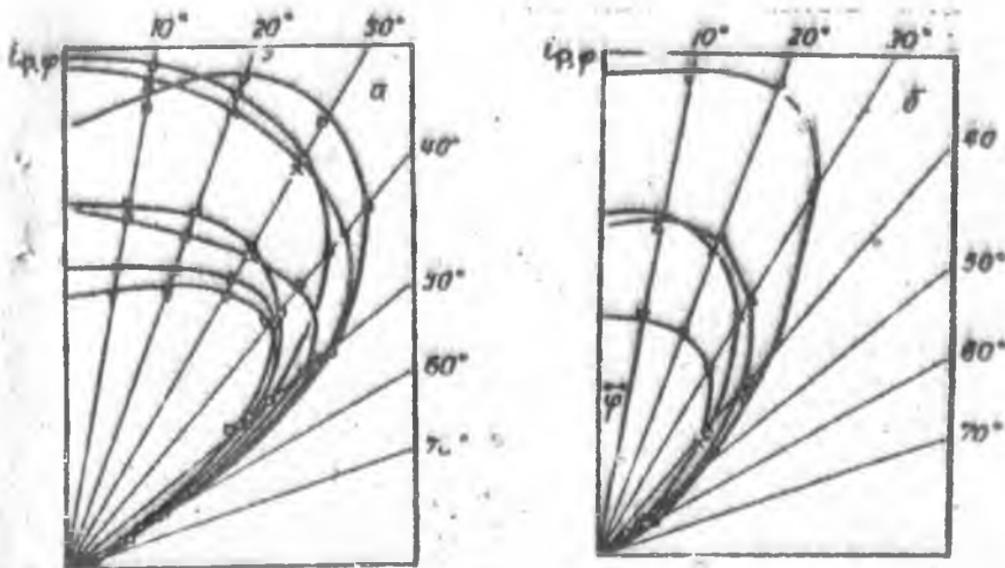


Рис. 2. Пространственное распределение боковой решетки кварцевым линзой и опалителем КСМ-3 при угле падения 10° :

а - кварцевый песок, воздушно сухое диэлектричество;
 1 - $0 < d \leq 0,25$; 2 - $0,25 \leq d \leq 0,5$; 3 - $0,5 \leq d \leq 1,0$ мм в интервале длин волн $\lambda = 1,6 - 5,0$ мкм; 4 - $0,25 \leq d \leq 0,25$; 5 - $0,25 \leq d \leq 0,5$; 6 - $0,5 \leq d \leq 1,0$ мм в интервале длин волн $\lambda = 0,9 - 2,5$ мкм; 7 - $0 < d < 0,25$ мм для $\lambda = 1,3$ мкм;
 б - опалителем КСМ-3 диэлектричество: 1 - $0 < d \leq 0,25$ мм при $\bar{Q} = 30,4\%$ для $\lambda = 1,3$ мкм; 2 - $0 < d \leq 0,25$ мм при $\bar{Q} = 30,4\%$ в интервале длин волн $\lambda = 0,9 - 2,5$ и $1,6 - 5,9$ мкм; 3 - $0,25 \leq d \leq 0,5$ мм при $\bar{Q} = 30,4\%$ в интервале длин волн $\lambda = 1,6 - 5,0$ мкм; 4 - $0,25 \leq d \leq 0,5$ мм при $\bar{Q} = 30,4\%$ для $\lambda = 1,3$ мкм