

## ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ И ХРАНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ

УДК 681.327.77 : 778.4

Л. Н. ВАГИН

(Москва)

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СТУПЕНИ МИНИАТЮРИЗАЦИИ ДОКУМЕНТОВ

Голографические информационные устройства [1] имеют целый ряд существенных преимуществ перед их фотографическими аналогами, что стимулирует работы по созданию комплекса голографических средств (ГС) для АСНТИ [2—4].

Возможности голографического метода уплотнения документальной информации так же, как и дискретной, определяются схемой записи голограмм, характеристиками объектива и лазера. Вместе с тем многообразии типов шрифтов, качества печати, форматов документов и их микрокопий, необходимость высокого качества и определенного масштаба восстановленного изображения предъявляют особые требования как к схемам записи и считывания голограмм, так и к информационным характеристикам ступени уменьшения: кратности  $K_r$ , плотности записи  $\rho_r$  и емкости голограммы  $M_r$ .

Особенности ряда оптических схем применительно к построению комплекса ГС АСНТИ рассматривались в работе [5].

Выражения для  $K_r$ ,  $\rho_r$  и  $M_r$  получены в [6], но без учета параметров шрифтов, текста и читаемости восстановленного изображения. Кроме того, в этой работе имеется в виду, что объектив перехватывает требуемые пространственные частоты с края объекта при любом расстоянии объект — объектив. Вместе с тем практический интерес представляет зависимость информационных характеристик от апертурного числа объектива  $F$ .

Цель настоящей работы — получение зависимостей  $K_r$ ,  $\rho_r$  и  $M_r$  от характеристик объектива и документа и от читаемости изображения для оценки предельных возможностей голографического метода миниатюризации документальной информации, а также некоторые экспериментальные исследования в этой области.

**Емкость голограммы.** Страница документа содержит в себе буквы, цифры и другие символы. Для упрощения анализа примем, что все буквы имеют одинаковые размеры и повторяются вдоль строки с периодом  $P_x$ . Обозначим период строк  $P_y$ , толщину штриха буквы  $b$  и охарактеризуем текст следующими параметрами:

$$\gamma_x = P_x/b; \quad (1)$$

$$\gamma_y = P_y/b; \quad (2)$$

$$\gamma = P_x P_y/b^2. \quad (3)$$

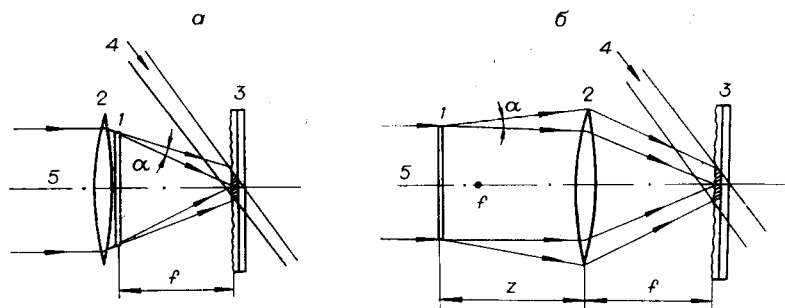


Рис. 1. Схемы голографической миниатюризации документов: а — транспарант за объективом; б — перед объективом; 1 — транспарант, 2 — объектив, 3 — голограмма, 4 — опорный пучок, 5 — объектный пучок.

Количество букв  $M$ , размещающихся на площади страницы,

$$M = \frac{a}{1+a^2} \frac{D_{\text{тр}}^2}{\gamma b^2}, \quad (4)$$

где  $D_{\text{тр}}$  — диагональ страницы;  $a$  — отношение высоты к ширине страницы.

Толщина штриха и диаметр голограммы Фраунгофера  $d_r$ , в которую записывается информация, содержащаяся в странице, связаны соотношением

$$d_r = 2\lambda f \kappa / b, \quad (5)$$

где  $\lambda$  — длина волны света;  $f$  — фокусное расстояние объектива;  $\kappa$  — коэффициент читаемости изображения.

Как было показано ранее [7, 8], для голографической миниатюризации целесообразней использовать не сами оригиналы, а их фотографические копии — микрофильмы или другие транспаранты. Две наиболее часто используемые схемы записи голограмм Фраунгофера отличаются размещением транспаранта по отношению к объективу, осуществляющему сжатие информации [5].

В одной из схем транспарант помещается за объективом (рис. 1, а). Найдем  $b$  из (5) и подставим его в (4). Получим выражение для емкости голограммы в этой схеме

$$M_{\text{ГЗ}} = \frac{a}{1+a^2} \frac{1}{4\gamma \kappa^2} \left( \frac{d_r}{\lambda F} \right)^2, \quad (6)$$

где  $F = fD_{\text{л}}^{-1}$ ;  $D_{\text{л}}$  — диаметр объектива.

В другой схеме голографирования транспарант находится перед объективом на расстоянии  $f \leq z \leq 2f$  (рис. 1, б). Функция объектива в этой схеме не ограничивается формированием сходящегося пучка света, как в предыдущем случае, а включает в себя также передачу в изображение пространственных частот объекта.

Существенное достоинство схемы — возможность восстановления голограммой увеличенного изображения объекта без объектива, что упрощает и удешевляет конструкцию читального аппарата [2, 4].

Из рис. 1, б видно, что при освещении транспаранта плоским пучком света

$$D_{\text{тр}} = D_{\text{л}} - 2z \operatorname{tg} \alpha, \quad (7)$$

где  $\alpha = \operatorname{arcsin}(\lambda \kappa / b)$ . В приближении малых углов

$$D_{\text{тр}} = D_{\text{л}} - z d_r / f. \quad (8)$$

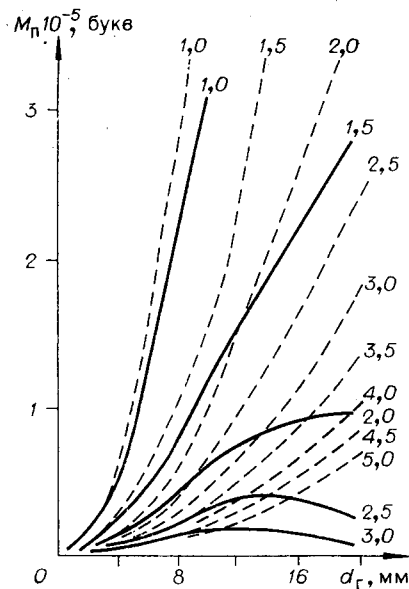


Рис. 2. Зависимость емкости голограммы от размера голограммы:  $a=1,5$ ;  $\kappa=1$ ;  $\gamma=70$ ;  $f=85$  мм;  $\lambda=632,8$  нм;  $B=10$  (транспарант перед объективом — сплошная кривая, транспарант за объективом — штриховая); параметр кривых — апертурное число объектива.

С помощью выражений (4) и (7) находим, что в схеме с транспарантом перед объективом емкость голограммы

$$M_{ГП} = M_{ГЗ} \left( 1 - \frac{d_r}{D_{\text{л}}} \frac{1+B}{B} \right)^2. \quad (9)$$

Здесь  $B$  — линейное увеличение изображения. Прежде всего отметим, что емкость голограммы обратно пропорциональна квадрату коэффициента читаемости восстановленного изображения.

Таким образом, при неудовлетворительной читаемости изображения емкость страницы текста, графического или другого материала придется уменьшить, увеличив размер букв, если условия голографирования не могут быть изменены. Когда переделка документа не представляется возможной, тогда следует воспользоваться более светосильным объективом и коротковолновым лазером.

Из выражений (6), (9) следует, что увеличение размера голограммы для записи большего количества информации однозначно только для схемы с размещением транспаранта за объективом. Анализ выражения (9) показал, что зависимость  $M_{ГП} = f(d_r)$  имеет, кроме тривиального экстремума  $M_{ГП} = 0$  при  $d_r = 0$ , еще две экспериментальные точки:  $M_{ГП} = 0$  при  $d_r = D_{\text{л}} B / (1+B)$  и  $M_{ГП} = M_{\text{max}}$  при  $d_{r \text{ max}} = 0,5 D_{\text{л}} B / (1+B)$ . Если  $B \geq 10$ , тогда размер голограммы для записи максимума информации равен примерно половине диаметра объектива. Этот результат совпадает с полученным в работе [6] для  $B = \infty$ .

Семейства кривых  $M_{ГЗ} = f(d_r)$ ;  $M_{ГП} = f(d_r)$  при различных значениях  $F$  приведены на рис. 2. Расчеты проводились для случая:  $\lambda =$

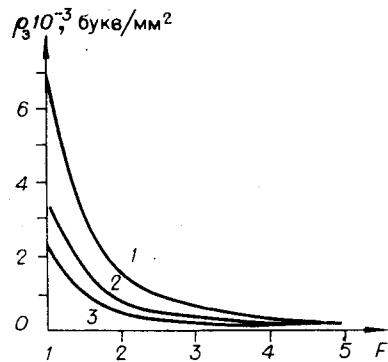


Рис. 3. Зависимость плотности записи текста в голограмме от апертурного числа объектива (транспарант за объективом):  $a=1,5$ ;  $\kappa=1$ ;  $\lambda=632,8$  нм; 1 —  $\gamma=50$ ; 2 —  $\gamma=100$ ; 3 —  $\gamma=150$ .

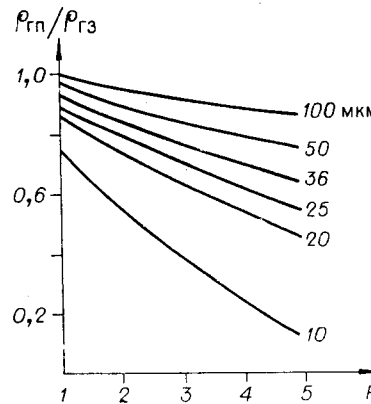


Рис. 4. Зависимость отношения плотностей  $\rho_{ГП}$  и  $\rho_{ГЗ}$  записи текста в схемах с транспарантом за и перед объективом от апертурного числа объектива:  $a=1,5$ ;  $\kappa=1$ ;  $\gamma=70$ ;  $B=10$ ;  $\lambda=632,8$  нм. (Параметр кривых — толщина штриха.)

$=632,8$  нм,  $\gamma=70$ ,  $\kappa=1$ ,  $a=1,5$  и  $B=10$ . Поскольку в выражении (9) величина, заключенная в скобки, всегда меньше единицы, то

$$M_{ГЗ} > M_{ГП}. \quad (10)$$

Это отличие наиболее существенно при  $d_r > 10$  мм. В интервале значений  $d_r$ , используемых для голографической миниатюризации документов ( $d_r < 5$  мм), разница не превышает 30%.

**Плотность записи информации.** В общем случае  $\rho_r = M_r S_r^{-1}$ , где  $S_r$  — площадь голограммы. Для буквенно-цифровой информации учетом схемы голографирования получаем

$$\rho_{ГЗ} = \frac{a}{1+a^2} \frac{1}{\gamma \kappa^2 \pi} \left( \frac{1}{\lambda F} \right)^2; \quad (11)$$

и максимальная плотность записи достигается снижением плотности записи.

Так же как и в случае дискретной информации [9],  $\rho_{ГЗ}$  пропорциональна  $(\lambda F)^{-2}$ . Зависимости  $\rho_{ГЗ} = f(F)$  для случая  $\kappa=1$ ,  $\lambda=632,8$  нм,  $a=1,5$  при трех значениях  $\gamma$  ( $\gamma=50$  — газетный текст;  $\gamma=100$  — текст БСЭ;  $\gamma=150$  — машинописный текст) приведены на рис. 3. Видно, что предельная плотность записи буквенно-цифровой информации в голограмме ( $F=1$  и без учета шумовых ограничений) составляет около  $7 \cdot 10^3$  букв/мм<sup>2</sup>. Для схемы с транспарантом за объективом плотность информации в голограмме не зависит от толщины штриха. Следовательно, при прочих равных условиях ( $a$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$ ,  $F$ ) одно и то же значение  $\rho_{ГЗ}$  достигается при голографировании «емкого» текста, состоящего из мелких букв, и текста с небольшим количеством, но набранного крупными буквами.

В схеме с транспарантом перед объективом зависимость  $\rho_{ГП} = f(b)$  существует, если апертура объектива освещена полностью уже при  $b = b_{\max}$ , т. е. при условии

$$D_n = D_{\text{тр max}} + (1+B/B) (2\lambda f \kappa / b_{\max}). \quad (13)$$

Синтезирование транспаранта из нескольких путем увеличения кратности микрофильмирования страницы сопровождается не только повышением емкости голограммы, но и уменьшением  $D_{\text{тр}}$  по сравнению с  $D_{\max}$ . Это объясняется необходимостью перехвата объективом возросшей пространственной частоты транспаранта.

В результате емкость голограммы растет медленнее, чем  $d_r^2$ . Так, например, если  $F=4$ ,  $f=10^2$  мм,  $B=10$ ,  $\gamma=10^2$  и  $\lambda=632,8$  нм, то при  $b_1=10^{-1}$  мм  $\rho_{ГП1}=226$  букв/мм<sup>2</sup>, но при  $b_2=10^{-2}$  мм  $\rho_{ГП2}=60$  букв/мм<sup>2</sup> ( $d_{r1}=1,26$  мм;  $d_{r2}=12,6$  мм;  $D_{\text{тр1}}=23,7$  мм;  $D_{\text{тр2}}=12,4$  мм;  $M_{ГП1}=280$  букв;  $M_{ГП2}=10^3$  букв).

Для сохранения размера транспаранта при изменении пространственной частоты потребуется изменение диаметра объектива. В этом случае, как показано в [6],  $\rho_{ГП}$  не будет зависеть от пространственной частоты транспаранта.

Рис. 4 демонстрирует результаты расчета  $\rho_{ГП}/\rho_{ГЗ} = f(F)$  с помощью выражений (11), (12) для различных значений  $b$ .

Известно, что буква любого алфавита может быть закодирована байтом двоичных знаков [10]. Поэтому емкость страницы текста в семантической форме  $M_c$  равна  $8M$ . Благодаря более оптимальной упу-

ковке документальной информации в семантической форме, чем в естественной (например, из-за отсутствия промежутков между словами и строками), плотность записи в семантической форме  $\rho_c$  выше. Найдем выражение для  $\rho_c$ , представив транспарант в виде комбинации прозрачных «да» и непрозрачных «нет» квадратов. Сторона квадрата

$$l = (S_{\text{тр}} M_c^{-1})^{1/2}, \quad (14)$$

где  $S_{\text{тр}}$  — площадь транспаранта. Поскольку  $S_{\text{тр}} = a(1 + a^2)^{-1} D_{\text{тр}}^2$ , то

$$l = b\sqrt{\gamma/8}. \quad (15)$$

Считывание восстановленного изображения информации в семантической форме производится фотодетекторами. Поэтому минимальный размер голограммы  $d_r^c$  ограничивается долей  $r$  ширины центрального лепестка картины дифракции Фраунгофера на квадратном отверстии. (По данным работы [9] значения  $r$  находятся в пределах  $0,5 \div 0,8$ .) Таким образом,

$$d_r^c = \frac{r}{\kappa} \sqrt{\frac{8}{\gamma}} d_r. \quad (16)$$

Используя выражения (6), (9) и (16), найдем, что плотность записи текста в семантической форме описывается выражениями

$$\rho_3^c = \frac{a}{1 + a^2} \frac{1}{\pi (r\lambda F)^2} = \left(\frac{\kappa}{r}\right)^2 \gamma \rho_{ГЗ} \quad (17)$$

и

$$\rho_{II}^c = \frac{a}{1 + a^2} \frac{\left(D_{II} - \frac{1+B}{B} d_r\right)}{\pi (r\lambda f)^2} = \left(\frac{\kappa}{r}\right)^2 \gamma \rho_{II}, \quad (18)$$

соответствующими расположению транспаранта за и перед объективом. Поскольку  $\gamma \gg 1$ , то  $\rho^c \gg \rho$ .

Таким образом, с точки зрения миниатюризации документальную информацию выгоднее голографировать не в аналоговой, а в семантической форме. Однако обращение к семантической форме требует дополнительных аппаратных затрат.

**Кратность голографической миниатюризации.** По определению [5]

$$K_r = D_{\text{тр}}/d_r. \quad (19)$$

Используя выражения (5), (6) и (11), находим, что в схеме с транспарантом за объективом

$$K_3 = b_0/2K_\phi\lambda F\kappa, \quad (20)$$

где  $b_0$  — толщина штриха оригинального текста;  $K_\phi$  — кратность фотогравической ступени миниатюризации. Как следует из выражения (20), кратность голографической миниатюризации приходится снижать, если требуется улучшить читаемость изображения. Повышение кратности достигается применением светосильных объективов и коротковолнового лазерного излучения.

Зависимость кратности миниатюризации от толщины штриха очевидна, поскольку с изменением  $b$  меняется диаметр голограммы. Кроме того, толщина штриха влияет на количество букв, уместяющихся на транспаранте, т. е. на емкость голограммы. Легко показать, что

$$K_3 = \frac{D_{II}}{2\lambda F\kappa} \left(\frac{a}{1 + a^2} \frac{1}{\gamma M_{ГЗ}}\right)^{1/2} = \frac{D_{II}}{2} \sqrt{\frac{\pi r \gamma}{M_{ГЗ}}}. \quad (21)$$

В схеме с транспарантом перед объективом диагональ транспаранта описывается выражением (8). Поэтому

$$K_n = K_s - (1+B)/B. \quad (22)$$

Таким образом,  $K_n < K_s$ . Зависимость  $K_n$  от емкости голограммы и читаемости восстановленного изображения находим с помощью выражений (4), (5), (8) и (19):

$$K_n = \frac{A + \sqrt{A^2 - C \sqrt{M_{\Gamma\Pi}}} \frac{1+B}{B}}{A - \sqrt{A^2 - C \sqrt{M_{\Gamma\Pi}}}}, \quad (23)$$

где  $A = 0,5D_n$ ;  $C = 2\lambda f \kappa \frac{1+B}{B} \sqrt{\frac{1+a^2}{\gamma}}$ . Как видно из (23), емкость голограммы не может превышать значения, найденного из условия

$$M_{\Gamma\Pi} = A^4 C^{-1}. \quad (24)$$

При этом  $K_n = (1+B)/B$ ;  $d_r = 0,5D_n B (1+B)^{-1}$ , а  $D_{\text{тр}} = 0,5D_n$ . Если  $B \geq 10$  (что часто встречается на практике), тогда  $K_n \approx 1$ .

Таким образом, максимум кривых  $M_{\Gamma\Pi} = f(d_r)$  на рис. 2 соответствует единичной кратности голографической ступени миниатюризации документа. Слева от максимума  $K_n > 1$ , справа —  $K_n < 1$ .

Результирующая кратность двухступенчатой миниатюризации документа

$$K_p = K_\phi K_r = b_0 / 2\lambda F \kappa. \quad (25)$$

Проиллюстрируем применение некоторых из полученных выражений для выбора объектива, когда заданы размер восстановленного изображения  $D_n$ , кратность голографического уменьшения  $K_r$  микрофильма и известны его параметры:  $D_{\text{тр}}$ ,  $b$  и другие.

Сначала находим  $d_r = D_{\text{тр}} K_r^{-1}$ , затем определяем  $f = D_{\text{тр}} b (K_r 2\lambda)^{-1}$ .

Из (22), (23) и (6) определяем  $F$ , имея в виду, что  $B = D_n D_{\text{тр}}^{-1}$ :

$$F = D_n b \{ 2\lambda \kappa [ D_n (K_n + 1) + D_{\text{тр}} ] \}^{-1}.$$

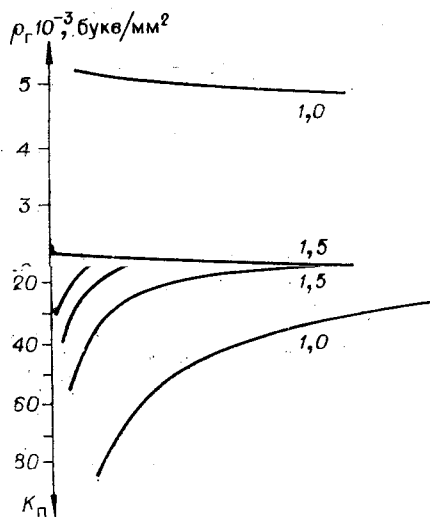
В свою очередь,

$$D_n = f F^{-1}.$$

**Параметрические информационные характеристики.** Как было показано в предыдущих разделах (выражения (6), (9), (11), (12), (20), (21), (22)), информационные характеристики  $\rho_r$ ,  $M_r$  и  $K_r$  являются функциями одних и тех же параметров:  $b$ ,  $\lambda$ ,  $F$ ,  $\kappa$ ,  $a$  и  $B$  (параметр  $B$  относится только к схеме с транспарантом перед объективом). Это позволяет построить пространственную параметрическую кривую  $\rho_r - M_r - K_r$  с помощью плоских кривых  $\rho_r = f(M_r)$ ,  $K_r = f(M_r)$ ,  $\rho_r = f(K_r)$ . Рис. 5, 6 иллюстрируют результаты расчета семейства кривых с помощью выражений (21), (23) для случая  $\gamma = 70$ ;  $a = 1,5$ ;  $\lambda = 632,8$  нм;  $B = 10$ . Параметром кривых является апертурное число объектива. На рис. 6, кроме того, приведена пространственная кривая  $\rho_r - M_r - K_r$  для случая  $F = 1,5$ .

Пространственные кривые или их плоские проекции позволяют однозначно найти кратность голографической миниатюризации и плотность записи информации в голограмме по емкости и формату документа, параметрам шрифта и требуемой читаемости восстановленного изображения.

Рис. 5. Плоские параметрические кривые «плотность записи информации — емкость голограммы — кратность голографической миниатюризации» для схемы с транспарантом перед объективом. Параметр кривых — апертурное число объектива.



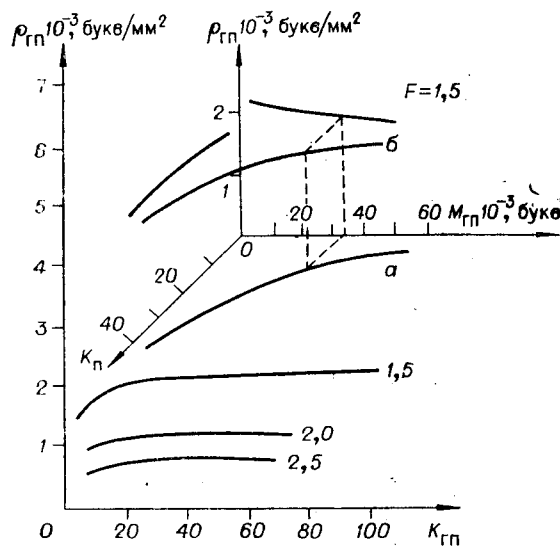
**Экспериментальные исследования**, не учитывавшимися при выводе выражений для информационных характеристик. Поэтому целесообразно установить границы применимости полученных выражений путем экспериментального определения зависимости отношения сигнал/фон (С/Ф) в восстановленном изображении от плотности записи текста в голограмме.

Изучались амплитудные голограммы текста книги. Емкость транспаранта составляла  $1,2 \cdot 10^4$  букв. Другие характеристики экспериментов были следующими:  $d_r = 2,9$  мм;  $\kappa = 1$ ;  $a = 1$ ;  $F = 1,5$ ;  $f = 85$  мм;  $\lambda = 632,8$  нм;  $\gamma = 85$ ;  $B = 10$ ; отношение интенсивностей опорного и объектного пучков равнялось 4:1, тип фотопластины „Agfa Gevaert 8E75“. Голограммы записывались в схеме, изображенной на рис. 1, б.

Плотность записи в одноэкспозиционной голограмме составляла  $\sim 2 \cdot 10^3$  букв/мм<sup>2</sup>. Отношение С/Ф в восстановленном изображении равнялось 60, что соответствовало высокому контрасту изображения.

Поскольку параметры объектива не позволяли повысить плотность записи в одноэкспозиционной голограмме, в последующем применялось наложение голограмм. Результаты экспериментов приведены на рис. 7.

Из рисунка видно, что при 7-кратном наложении изображение читалось легко при отношении сигнал/шум, равном 20. Этому минимально допустимому



Изображение читалось легко при отношении сигнал/шум, равном 20. Этому минимально допустимому

Рис. 6. Параметрические кривые: а — «плотность записи — кратность голографической миниатюризации»;  $\rho_{гп}$  —  $K_{гп}$  —  $M_{гп}$ . Параметр кривых — диафрагменное число объектива;  $\gamma = 70$ ;  $\lambda = 632,8$  нм;  $B = 10$ ;  $a = 1,5$ .

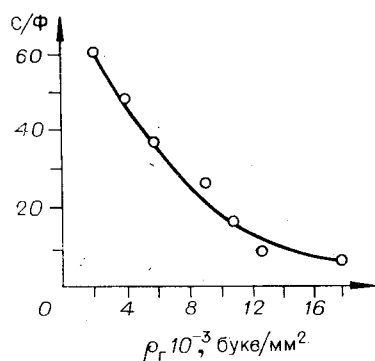


Рис. 7. Зависимость отношения сигнал/фон в восстановленном изображении текста от плотности записи в амплитудной голограмме.

значению  $S/\Phi$  соответствует плотность записи  $\rho_r \approx 10^4$  букв/мм<sup>2</sup>.

При голографической миниатюризации реальных документов с помощью доступных объективов и наиболее коротковолновых лазеров, т. е. при условиях  $a=1,5$ ;  $\gamma_{\text{мид}}=50$ ;  $\kappa=1$ ;  $F=1,5$  и  $\lambda=448$  нм (He-Cd-лазер), плотность записи в голограмме не превышает  $7 \cdot 10^3$  букв/мм<sup>2</sup>. Таким образом, информационные характеристики голографической ступени миниатюризации документов практически ограничиваются не шумами голограммы, а характеристиками оптической системы, включая длину волны излучения лазера, как это дается выражениями (6), (9), (11), (12), (20), (21), (22).

**Заключение.** Показано, что плотность записи документальной информации в голограмме обратно пропорциональна квадрату коэффициента читаемости восстановленного изображения; схема с расположением транспаранта за объективом предпочтительнее с точки зрения достижения наивысших значений  $K_r$ ,  $\rho_r$  и  $M_r$  при миниатюризации тех же документов, что и в схеме с транспарантом перед объективом; информационные характеристики голографической ступени миниатюризации документов ограничиваются характеристиками оптической системы и длиной волны лазера, а не шумами голограммы.

Получены выражения и введены пространственные параметрические кривые  $\rho_r - M_r - K_r$  или их плоские проекции  $\rho_r = f(M_r)$ ;  $K_r = f(M_r)$ ;  $\rho_r = f(K_r)$ , позволяющие

1) оценить предельные характеристики (кратность, плотность записи) голографической ступени миниатюризации существующих фотографических микрокопий документа;

2) выбрать толщину штриха, заполнение и формат страницы для наибольшего уплотнения текста в голограмме при помощи имеющихся в распоряжении объектива, лазера и с учетом читаемости восстановленного изображения.

Автор приносит свою глубокую благодарность В. А. Румянцеву, И. А. Михайлову, Р. В. Жуковой, принимавшим участие в экспериментах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вагин Л. Н. Голографические информационные устройства. — «Электрон. пром-сть», 1973, № 5, с. 63—64.
2. Вагин Л. Н., Михайлов И. А., Филатов А. М. Голографический читальный аппарат. — ОМП, 1973, № 12, с. 69.
3. Вагин Л. Н., Филатов А. М., Назарова Л. Г., Егоров В. И., Чиченев С. А., Воробьев С. П. — В кн.: Тезисы докладов 2-й Всесоюзной конференции по голографии. Ч. 1. Киев, 1974, с. 85.
4. Вагин Л. Н., Герус В. Л., Филатов А. М. — «НТИ. Сер. 1», 1978, № 6.
5. Вагин Л. Н., Назарова Л. Г., Арсеньева Т. М., Ванин В. А. — «Опт. и спектр», 1975, т. 38, вып. 5, с. 994—998.
6. Vander Lught A. — «Appl. Opt.», 1975, vol. 14, N 5, p. 1081—1087.
7. McMahon M. H. — «Appl. Opt.», 1972, vol. 11, N 4, p. 798—806.
8. Вагин Л. Н., Михайлов И. А. Одноступенная голографическая миниатюризация документов с высокими кратностями уменьшения (более 1:50). — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1976, т. 21, вып. 2, с. 113—116.
9. Takeda Y. — «Jap. J. Appl. Phys.», 1972, vol. 11, p. 656—665.
10. McCamy C. S. — «Appl. Opt.», 1965, vol. 4, N 4, p. 405—411.

Поступила в редакцию 20 декабря 1977 г.;  
окончательный вариант — 17 апреля 1978 г.