

## **О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕРТОЛЕТА ДЛЯ АЭРОСЪЕМКИ**

*Л. Н. Кель, А. П. Трунин*

### **1. Постановка задачи**

В настоящее время использование аэросъемки приобрело широкий размах не только для мелкомасштабного картирования земной поверхности, но и для создания топографических планов в крупных масштабах. Известны, например, успехи Союзмаркштреста, предприятия которого, применяя аэросъемку, ежегодно выпускают на значительные площади топографические планы в масштабах 1:5000 и 1:2000. С большим успехом применяется крупномасштабная съемка и на дорожных изысканиях, при съемке городов, в землеустройстве.

Однако, несмотря на эти успехи, проблему внедрения крупномасштабной съемки, и в частности для картирования малых площадей, нельзя считать полностью решенной.

Под малыми площадями условимся понимать:

а) объекты горнопромышленных районов площадью порядка нескольких квадратных километров, не охватываемые общим массивом съемки и картируемые в крупных масштабах 1:5000—1:2000 (шахтные поля, шахтные поселки и т. п.);

б) то же, но в порядке пополнения общего массива съемки, картирование которого было выполнено ранее и в отдельных его частях в той или иной степени устарело;

в) открытые горные разработки угля, руды и других полезных ископаемых (путевое хозяйство и другие подробности на уступах карьеров).

При съемке этих объектов маркшейдеры вынуждены все еще применять мензулу и тахеометр. Если учесть, что ежегодный объем крупномасштабных съемок малых площадей очень велик и что производство их наземными способами чрезвычайно трудоемко и дорого, то станет ясной необходимость поисков иных методов решения вопроса.

Использование для аэросъемки малых площадей самолетов не дает и не может дать должного эффекта. Более благоприятные, на наш взгляд, перспективы имеет применение вертолета, который во многих отношениях выгодно отличается от самолета.

До настоящего времени вертолет не нашел применения для аэросъемки с картосоставительскими целями, поэтому исследования в этом направлении авторы считают полезными.

Известно, что в настоящее время производятся вертолеты различных конструкций и размеров.

Наиболее распространенный в СССР тип вертолета МИ-4 по своим характеристикам является наиболее приемлемым для аэросъемки.

Потолок вертолета МИ-4 4000 м, грузоподъемность около 1 т, крейсерская скорость 160 км/час.

Устойчивая горизонтальная скорость возможна в пределах 50—160 км/час, колебания скорости в этом диапазоне не превосходят 4 км/час; причем эти колебания при  $W = 100$  км/час не превосходят 3 км/час. «Зависание» вертолета возможно в диапазоне 1—10 м и выше 200 м; зависание в пределах 10—200 м запрещено инструкцией.

Колебание высоты на маршруте не превосходит 10 м. Навигационное оборудование почти ничем не отличается от самолетного. Особенности конструктивного выполнения кабины вертолета позволяют командиру и штурману хорошо обзирать местность впереди и по сторонам, а оператору — впереди и внизу.

Вибрация частей вертолета сильнее всего ощущается при его «зависании» и при скорости до 50 км/час.

С точки зрения летносьемочного процесса вертолет обладает несомненными преимуществами перед самолетом. Наиболее существенные из них следующие:

а) упрощается возможность стабилизации АФА при горизонтальном положении снимка в момент съемки, вероятно, даже с помощью простого уровня;

б) полностью или частично исключается основная причина, вызывающая смаз изображения;

в) появляется возможность упрощения конструкции АФА;

г) возможно расположение вертолета в пространстве для отдельных снимков по заданию, что особенно важно при съемке малых площадей и обновлении (пополнении) планов;

д) вертолет не требует специальной площадки для взлета и посадки, что особенно важно для труднодоступных районов страны.

Для полного освещения пункта «б» преимуществ вертолета разберем влияние всех движений летательного аппарата на фотоизображение местности.

Связь аэрофотокамеры с летательным аппаратом (самолетом или вертолетом) неизбежно передает все движения его как плавные, так и резкие камере и снимку, что во время экспонирования вызывает перемещение изображений точек местности по снимку, нарушая этим резкость изображения. Поступательные движения летательного аппарата вызывают поступательные движения центра проекции и самого аэроснимка. Вращательные движения при несовпадении центра вращения и центра проекции снимка вызывают одновременно поступательное перемещение снимка и вращательное движение его вокруг центра проекции. Таким образом, мы должны рассматривать:

1) поступательные движения снимка вместе с его центром проекции и

2) вращательные движения снимка вокруг условно неподвижного центра проекции при находящемся в движении летательном аппарате и неподвижной местности.

Всякое поступательное движение горизонтального снимка с его центром проекции можно разложить на две составляющих: одно по определенному горизонтальному направлению, другое по вертикальному направлению (по оси  $Z$ ).

Горизонтальное поступательное перемещение летательного аппарата вызывает сдвиг изображения на снимке в направлении перемещения

$$\delta = e_{п. г} = m W_r \tau = \frac{f}{H} W_r \tau, \quad (1)$$

где  $H$  — отстояние изображаемой точки;

$W_r$  — скорость горизонтального перемещения, в которой доминирующим слагаемым является путевая скорость летательного аппарата;

$\tau$  — продолжительность экспонирования;

$f$  — фокусное расстояние камеры;

$m$  — масштаб снимка.

Влияние поступательного перемещения камеры с горизонтальным снимком в вертикальном направлении на сдвиг изображения может быть выражено формулой, аналогичной формуле редуцирования за изменение высоты полета, а именно

$$e_{п. в} = \frac{\Delta H}{H} r = \frac{r}{H} W_v \tau = \frac{m\tau}{f} W_v r, \quad (2)$$

где  $r$  — радиус-вектор на снимке из центра снимка;

$W_v$  — скорость поступательного вертикального перемещения камеры.

Как видим,  $e_{п. г}$  и  $e_{п. в}$ , т. е. сдвиги точек на снимке от поступательных перемещений камеры, зависят от отстояния  $H$  изображенной точки или от масштаба изображения  $m$  (при данном  $f$ ).

При низком полете и значительной выдержке может получиться недопустимый сдвиг или „смаз“ изображения. Так как обычно

$$f > r \text{ и } W_r > W_v, \text{ то } e_{п. г} \text{ всегда } > e_{п. в}.$$

Движение аэрофотокамеры вокруг ее центра проекции  $S$ , вызванное угловыми колебаниями летательного аппарата или самостоятельным поворотом камеры в ее установке и переданное аэроснимку, может быть представлено вращением последнего вокруг некоторой мгновенной неподвижной оси  $SQ$ , проходящей через центр вращения  $S$ , на небольшой угол  $\delta\theta$ . Как показано на рис. 1, это вращение вызывает:

1) наклон снимка на угол

$$\delta\alpha = \frac{\overline{OO'}}{f}$$

при

$$\overline{OO'} = \overline{OE}\delta\theta = \delta\theta f \sin A,$$

где  $A$  — надирное расстояние оси вращения;

2) поворот снимка в его плоскости вокруг точки  $Q$  на снимке на угол

$$\delta\beta = \frac{\overline{OO'}}{\overline{OQ}} \text{ при } \overline{OQ} = f \operatorname{tg} A.$$

Отсюда легко установить, что

$$\delta\alpha = \delta\theta \sin A; \quad \delta\beta = \delta\theta \cos A.$$

Наклон на угол  $\delta\alpha$  повлечет за собой перемещение изображения  $P$  некоторой контурной точки по оси  $U$  (линии нулевых искажений),

совпадающей с проекцией  $OQ$  оси  $SQ$  на величину  $\delta u_1 = 0$  и по оси  $V$  на величину

$$\delta v_1 = \delta \alpha \frac{v^2}{f}.$$

Поворот на угол  $\delta \beta$  вокруг следа  $Q$  оси  $SQ$  на снимке дает перемещение точки  $P$  на величину

$$\overline{PP'} = \overline{PQ} \delta \beta.$$

Проекции этого перемещения будут, как видно из рис. 1: на ось  $U$  отрезок  $\delta u_2 = \overline{PQ} \delta \beta \sin \beta$ ; на ось  $V$  отрезок  $\delta v_2 = \overline{PQ} \delta \beta \cos \beta$ .

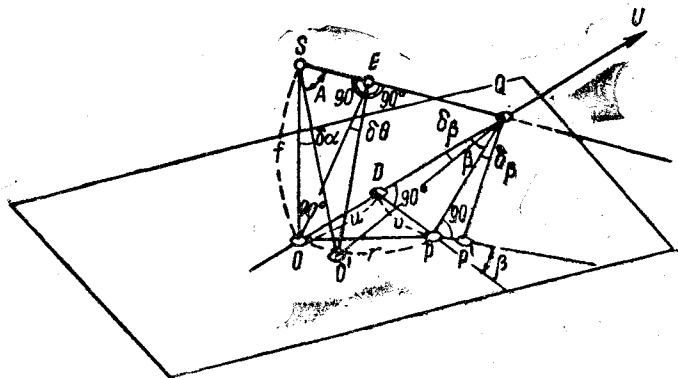


Рис. 1

Угол  $\beta$  является острым углом при вершине  $Q$  прямоугольного треугольника  $DQP$  с гипотенузой  $QP$ , поэтому

$$\sin \beta = \frac{v}{PQ}; \quad \cos \beta = \frac{DQ}{PQ};$$

при

$$DQ = \overline{OQ} - u = f \operatorname{tg} A - u.$$

В связи с этим

$$\delta u_2 = \delta \beta v = \delta \theta v \cos A,$$

$$\delta v_2 = \delta \beta (f \operatorname{tg} A - u) = \delta \theta (f \sin A - u \cos A).$$

Суммируя перемещение точки  $P$  по оси  $U$  и  $V$ , получаем

$$\delta u = \delta u_1 + \delta u_2 = \delta \theta v \cos A, \quad (3)$$

$$\delta v = \delta v_1 + \delta v_2 = \delta \theta \left[ \left( \frac{f^2 + v^2}{f} \right) \sin A - u \cos A \right]. \quad (4)$$

И, наконец, общее перемещение точки  $P$  по снимку, направленное по дирекционному углу

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\delta v}{\delta u} = \operatorname{arctg} \left[ \left( \frac{f}{v} + \frac{v}{f} \right) \operatorname{tg} A - \frac{u}{v} \right], \quad (5)$$

выразится величиной

$$e_p = \sqrt{\delta u^2 + \delta v^2} = \delta \theta \sqrt{\left[ \left( \frac{f^2 + v^2}{f} \right) \sin A - u \cos^2 A \right]^2 + v^2 \cos^2 A}.$$

Выражая  $\delta\theta$  через  $\omega\tau$ , где  $\omega$  — угловая скорость вращения вокруг оси  $SQ$  и  $\tau$  — время экспонирования, получим

$$e_v = \omega\tau \sqrt{\left(\frac{f^2 + v^2}{f} \sin A - u \cos A\right)^2 + v^2 \cos^2 A}. \quad (6)$$

При  $A = 90^\circ$ , т. е. когда ось  $SQ$  параллельна плоскости аэроснимка (или горизонтальна при горизонтальном снимке),

$$e_{v, \Gamma} = \omega\tau \left(f + \frac{v^2}{f}\right) = \frac{f\omega\tau}{\cos^2 \theta} \text{ при } \varphi = 90^\circ. \quad (7)$$

Здесь  $\cos^2 \theta = \frac{f^2}{f^2 + v^2}$ , т. е.  $\theta$  представляет собой угол в вертикальной плоскости, перпендикулярной к оси вращения.

При  $A = 0^\circ$ , когда ось  $SQ$  вертикальна или совпадает с осью  $Z$ ,

$$e_{v, B} = \omega \cdot \tau \sqrt{u^2 + v^2} = r\omega\tau \text{ при } \operatorname{tg} \varphi = -\frac{u}{v}. \quad (8)$$

Здесь  $e_{v, B}$  направлено перпендикулярно к радиусу-вектору  $r$

$$\varphi = \theta + 90^\circ; \operatorname{tg} \theta = \frac{v}{u}; \operatorname{tg} \varphi = -\operatorname{ctg} \theta = -\frac{1}{\operatorname{tg} \theta} = -\frac{u}{v}.$$

При одинаковых угловых скоростях  $\omega_\Gamma$  и  $\omega_B$  сдвиг изображения от вращения вокруг горизонтальной оси будет больше сдвига от вращения вокруг вертикальной оси ( $e_{v, \Gamma} > e_{v, B}$ ), так как первый имеет множитель  $\left(f + \frac{v^2}{f}\right)$ , а второй —  $r$ , и  $f$  обычно больше  $r$

$$e_{v, \Gamma} - e_{v, B} = \omega\tau \left(f + \frac{v^2}{f} - r\right), \quad (9)$$

$e_{п. в}$  и  $e_{v, B}$  взаимно-перпендикулярны, так как  $e_{п. в}$  направлено по радиусу-вектору  $r$ , а  $e_{v, B}$  — перпендикулярно к нему.

Суммарный сдвиг точки на снимке от всех движений фотокамеры, происходящих в момент экспонирования, является некоторым вектором, представляющим собой геометрическую сумму векторов сдвигов от горизонтального и вертикального поступательных движений и от вращательного движения фотокамеры вокруг ее центра проекции

$$\begin{aligned} \vec{e} = \vec{e}_{п. \Gamma} + \vec{e}_{п. B} + \vec{e}_B = \tau \left[ \frac{f}{H} \vec{W}_\Gamma + \frac{r}{H} \vec{W}_B \right] + \\ + \omega \sqrt{\left(\frac{f^2 + v^2}{f} \sin A - u \cos A\right)^2 + v^2 \cos^2 A}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $W_\Gamma$  и  $W_B$  — горизонтальная и вертикальная скорости поступательного движения;

$\omega$  — угловая скорость вращения;

$u$  и  $v$  — координаты смещаемого изображения точки на снимке при оси  $U$ , совпадающей с проекцией на снимке неподвижной оси вращения и при начале в главной точке снимка.

Сдвиг  $e_v$  от вращения камеры вокруг ее неподвижного центра проекции  $S$  не зависит от отстояния  $H$  точки  $P$  местности, изображенной на снимке, или от расстояния этой точки от центра проекции  $S$ .

Если рассматривать только летящий самолет в обычном случае съемки, то в геометрической сумме  $\vec{e}$  доминирующим является слагае-

мое  $e_{п. г.}$ , как содержащее в себе в качестве главного геометрического слагаемого сдвиг от горизонтального продвижения самолета за время экспонирования  $\tau$  с путевой скоростью  $W$ .

Поэтому в нашем случае можно считать с достаточным приближением, что

$$\vec{e} = \frac{f}{H} \tau \vec{W}_r = m \tau W_r. \quad (11)$$

Эта формула, данная выше за номером (1), и принимается при расчете параметров плановой аэросъемки для максимально допустимой выдержки  $\tau$  или  $t$ .

В случае применения вертолета, наоборот, влияния  $e_r$  не будет, или эта величина будет сведена к минимуму. Неощутимым, так же как и для самолета, будет и влияние  $e_{п. в}$  от вертикального перемещения вертолета. Остается  $e_v$  — влияние вращательного движения. И здесь также нет оснований считать его большим, чем для самолета.

Следовательно, для вертолета влиянием  $e$  вполне можно пренебречь, в чем и состоит его явное преимущество перед самолетом.

Но кроме общих плавных движений самолета или вертолета в целом, отдельные точки их вследствие работы моторов претерпевают вибрацию. Вибрация или колебания с большой частотой передаются и точкам крепления камеры. Причем колебания последних совершаются в различных направлениях, с различными амплитудами и с несовпадающими фазами для отдельных точек крепления.

Вследствие этого камера, прикрепленная к самолету или вертолету несколькими точками, совершает как линейные (поступательные), так и угловые колебания. Эти колебания вызывают во время экспозиции нерезкость изображения (сдвиги изображений). Перемещения аэрофотокамеры вследствие линейных колебаний будут очень малы по отношению к большим расстояниям до снимаемых точек, тогда как перемещения от угловых колебаний должны быть отнесены к небольшим расстояниям между точками крепления аэрофотокамеры, не превышающим 1 м. Последнее может дать заметные углы вращения при значительной угловой скорости аэрофотокамеры, и мы по формуле (6) можем получить недопустимый сдвиг  $e_v$  изображения.

Линейной вибрацией аэрофотокамеры практически можно пренебречь, следует лишь принять меры для уменьшения ее угловых колебаний, возникающих под влиянием вибрации основания аэрофотоустановки.

Вопрос этот как для самолета, так и для вертолета в особенности, требует дополнительного изучения. Однако предварительное знакомство с вертолетом показывает, что нет каких-либо оснований преувеличивать опасность влияния вибрации.

Перечисленные выше преимущества вертолета создают благоприятные возможности его применения для съемки «малых площадей» и дополнительных съемок. Воздушная съемка с вертолета здесь несомненно перспективна.

Важное значение, на наш взгляд, может иметь применение вертолета для методов узловых точек, разработанного Л. Н. Келлем [1].

Можно ожидать, что с вертолета легче будет получить горизонтальные или, во всяком случае, близкие к ним снимки в нужных местах или в нужные моменты, что чрезвычайно важно. Можно, например, для какого-либо конкретного объекта съемки методом проф. Л. Н. Келля скомбинировать один верхний снимок с четырьмя нижними.

По верхнему горизонтальному снимку, полученному длиннофокусной камерой, создается контурная часть плана почти без искажения, одним масштабированием (при необходимости влияние рельефа можно, конечно, учесть). Используя наиболее выгодные сочетания нижних снимков с верхним, получают высотную часть плана.

Рекомендуемая схема может быть применена и для съемки значительных участков, особенно если она преследует цель пополнения и уточнения ранее созданных планов; контурную часть получают из длиннофокусных верхних снимков, а высотную — из короткофокусных нижних в комбинации с верхними, причем нижние снимки, в случае пополнительного характера съемки, залетываются вертолетом выборочно, там где это нужно.

На вертолете может быть установлено специальное визирное приспособление, позволяющее ему подниматься примерно по вертикальной линии и производить последовательно съемку над одной точкой местности. При наличии верхних снимков, полученных заранее, этим можно воспользоваться для наиболее рационального размещения нижних снимков.

## 2. Экспериментальные работы по съемке малых площадей

Для производства экспериментов был выбран вертолет МИ-4. В результате экспериментальных съемок предполагалось выяснить, во-первых, перспективы получения снимков, близких к горизонтальным (с углами до 4—5') при горизонтировании АФА по уровням, и, во-вторых, возможности получения автоматическим АФА снимков, удовлетворительных по фотограмметрическому качеству.

Для решения поставленных задач были проведены полевые и лабораторные работы. Для полевого фотографирования на базе полуавтоматической камеры Гейде была изготовлена специальная съемочная аппаратура. Камера эта снабжена двумя кассетами с шестью стеклянными пластинками в каждой, объективом светосилой 6,3;  $f = 180$  мм; затвор диафрагмовый с временем экспонирования от 1 до 1/200 сек.

Камера была вмонтирована в карданный подвес от большого морского гирокомпаса, ось которого надежно крепилась в специальной жесткой подставке. Амортизаторами служили две резиновые шайбы. Специального расчета амортизации произведено не было.

В горизонтальное положение камера приводилась двумя цилиндрическими уровнями с ценой деления 2', укрепленными на камере перпендикулярно друг другу и параллельно плоскости прикладной рамки кассеты.

В полете было установлено, что пузырьки уровней вследствие вибрации «кипят», не раздробляясь, и к моменту экспонирования без труда могут быть установлены от руки на середине с точностью до 1—2 делений (2—4').

Были получены снимки в масштабе 1 : 2000 как во время «зависания» вертолета (одиночные), так и во время полета по маршруту (при скорости движения вертолета 60 км/час).

Обработке подверглись 25 пар маршрутных снимков. Фотографическое и фотограмметрическое качество снимков было оценено, в общем, как удовлетворительное. Однако были и следующие недостатки:

1) несмотря на одинаковые условия проявления, негативы оказались разнотонными, на отдельных снимках наблюдалась заметная вуаль. При тщательном рассмотрении  $\times 4$ -кратным увеличением на этих снимках был обнаружен поперечный смаз изображения (до 0,20 мм вблизи главной точки снимка), вызванный, по-видимому, угловой вибрацией;

2) наличие сильного бортового ветра при малой скорости вертолета обусловило появление «елочки» до  $7^\circ$ ;

3) качество снимков, полученных в момент «зависания», несколько ниже качества снимков того же места, полученных в полете.

Фотограмметрическая обработка снимков показала, что главная задача — получение горизонтальных снимков — оказалась не решенной.

Значения углов взаимного ориентирования, подсчитанные по поперечным параллаксам, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Взаимный наклон, мин.	Углы, мин.		Примечание
	продольные	поперечные	
0—10	10	9	Совместные значения $\Delta\alpha_y$ и $\Delta\alpha_x$ не превосходят 10 мин. только у 5 пар
10—20	5	7	
20—40	10	7	
40—60	—	2	

Судя по полученным углам взаимного ориентирования, имеющим разные значения и различные знаки, углы внешнего ориентирования также не будут удовлетворять требованию, которое было поставлено, т. е. будут значительно отличаться от нуля.

Для установления причин, вызвавших отклонения снимков в момент экспонирования, было исследовано поведение пузырька уровня в условиях вибрации.

Известно, что вибрация летательного аппарата вызывается, главным образом, работой моторов («моторная вибрация»). Линейная частота колебаний может быть определена отношением  $\frac{N}{60}$ , где  $N$  — число оборотов вала мотора в минуту.

Число оборотов вала в зависимости от режима работы вертолета колеблется в пределах 2000—2400 об/мин.

Из-за отсутствия на вертолете вибрографа замерить амплитуду колебаний места крепления АФА не удалось, однако можно с достаточным основанием полагать, что она по-видимому не должна превышать более чем в два раза амплитуду вибрации на самолете (0,2 мм).

Для производства экспериментов в лабораторных условиях был изготовлен вибростол, позволяющий получать частоту колебаний до  $100 H_z$  при амплитудах от 0,05 до 0,5 мм.

В соответствии с принятыми выше параметрами вибрации вертолета

$$\left( n = \frac{N}{60} = \frac{2000 - 2400}{60} = 35 - 40 H_z; \text{ амплитуда до } 0,5 \text{ мм} \right)$$

и было исследовано поведение уровня.

Как показало это исследование, использование уровней для горизонтирования камеры при амплитудах 0,20—0,40 мм вообще исключается, а применение при амплитудах до 0,20 мм может привести к негоризонтальности до  $30'$ .

Устойчивость уровня (при падении чувствительности примерно в 1,5 раза) на всем диапазоне частот от 25 до  $90 H_z$  имеет место при амплитудах до 0,05 мм.

Любопытно, что при увеличении частоты до  $90 H_z$  при амплитуде около 0,10—0,15 мм пузырек уровня вновь возвращается на середину, однако чувствительность его падает примерно в 4 раза.

Определение величины максимального схода пузырька уровня показало, что она может достигать 50—60 мин.

Попутно с основным исследованием и изучением зависимости поведения уровня от параметров вибрации было изучено влияние ускорений, вызываемых изменением режимов работы мотора. Было установлено, что изменение числа оборотов источника вибрации на 5—7% (с 2000 до 2100; с 2200 до 2350) не влечет за собой сколько-нибудь заметного отклонения пузырька уровня.

Как указывалось выше, при съемке не удалось получить горизонтальных снимков, это следует объяснить тем, что амортизаторы, которыми была снабжена камера, не погасили в достаточной мере ее вибрации, и амплитуда ее колебаний оказалась выше критической (0,05 мм).

С целью подтверждения сказанного найдем косвенным путем амплитуду колебания камеры в момент экспонирования.

Для решения задачи преобразуем выведенную ранее формулу (7), позволяющую определить сдвиг изображения для такого положения, когда мгновенная ось вращения параллельна плоскости снимка. В этом случае вблизи главной точки, т. е. когда  $\Theta = 0$ , будем иметь:

$$e_b = \omega \tau f. \quad (12)$$

Заменим угловую скорость через параметры вибрации. Уравнение вибрации можно записать как уравнение гармонического колебания:

$$U = a \sin(p\tau + \varphi),$$

где  $a$  — амплитуда колебания;

$p$  — циклическая или круговая частота;

$\varphi$  — начальная фаза колебаний.

Уравнение угловых колебаний для случая, когда амплитуды колебаний противоположных опор камеры одинаковы, можно получить, заменив линейную величину  $a$  угловой

$$\alpha = \frac{2a}{l} \sin(p\tau + \varphi),$$

где  $l$  — расстояние между точками опоры.

Угловая скорость найдется как производная от  $\alpha$  по времени

$$\alpha' = \omega = \frac{2a}{l} p \cos(p\tau + \varphi).$$

Подставив в формулу (12) значение угловой скорости, получим:

$$e_b = \frac{2a}{l} p \tau f \cos(p\tau + \varphi)$$

или для максимального значения угловой скорости

$$e_b = \frac{2a}{l} p \tau f. \quad (13)$$

К такому же результату, но несколько иным путем пришли Б. И. Брустин, С. С. Гилев и др. [3].

Из выражения (13) можно получить

$$a = \frac{e_b \cdot l}{2fp\tau}.$$

Принимая согласно вышеуказанному  $e_в = 0,2$  мм и полагая

$$l = 400 \text{ мм}; f = 180 \text{ мм};$$

$$p = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2\pi \cdot 2000}{60} = 210 \text{ рад/сек}; \tau = 0,01 \text{ сек.},$$

будем иметь

$$a = \frac{0,2 \cdot 400}{2 \cdot 180 \cdot 210 \cdot 0,01} = 0,11 \text{ мм.}$$

Как известно из лабораторных испытаний, при такой величине амплитуды и линейной частоте  $\frac{N}{60} = 35-40 \text{ Hz}$  возможны ошибки в показаниях уровня до  $60'$ , что фактически и имело место (см. табл. 1).

Этим же экспериментом установлено, что поведение уровня является устойчивым при амплитудах, не превышающих  $0,05$  мм. Расчеты показывают, что для условий вибрации основания камеры на вертолете, уменьшение амплитуды колебаний камеры до  $0,05$  мм можно получить, если камеру поставить на амортизаторы со статическим прогибом порядка  $25-30$  мм.

Найдем теперь характер изменения величины сдвига в зависимости от изменения надирного угла.

Исследуем с этой целью сдвиг изображения при условии

$$f = 2u = 2v; f = 180 \text{ мм и } a = 0,05 \text{ мм,}$$

для чего перепишем формулу (6) следующим образом:

$$e = \frac{\delta\theta f}{4} \sqrt{25 \sin^2 A - 20 \sin A \cos A + 8 \cos^2 A}.$$

Обозначив коэффициент при  $\delta\theta f$  через  $K$ , найдем значения  $K$  для различных надирных расстояний  $A$  (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициентов  $K$  при различных углах  $A$

Значение угла $A^\circ$	0	30	45	60	75	90	120	135	150
$K$	0,70	0,47	0,56	0,88	1,07	1,25	1,37	1,30	1,15
Значение угла $A^\circ$	180	225	240	270	285	300	315	330	360
$K$	0,70	1,30	1,37	1,25	1,07	0,88	0,56	0,47	0,70

Наглядное представление о характере изменения  $K$  дает приведенный ниже график (рис. 2).

Таким образом, при заданных условиях сдвиг достигает максимального значения при  $A = 120^\circ$ , когда он будет равен.

$$e = 1,37\delta\theta f, \text{ или } 1,37 \frac{\delta\alpha}{\sin A} f \left( \text{поскольку } \delta\theta = \frac{\delta\alpha}{\sin A} \right).$$

Подставляя значения

$$\delta\alpha = \frac{2a}{l} = \frac{0,1}{400} = \frac{1}{4000}; f = 180 \text{ мм и } \sin 120^\circ = 0,85,$$

будем иметь окончательно

$$e_{\max} = 1,37 \cdot \frac{180}{4000 \cdot 0,85} = 0,07 \approx 0,1 \text{ мм.}$$

что удовлетворяет требованиям фотограмметрической обработки.

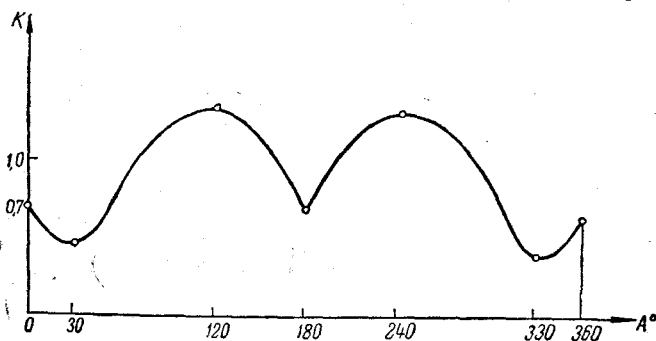


Рис. 2

В заключение рассмотрим вопрос об ошибке в продольном перекрытии, имеющей особое значение для съемки с малых высот. При крупномасштабной съемке, как известно, решающее влияние на погрешность продольного перекрытия имеет ошибка интервала времени.

Эта ошибка имеет вид [2]

$$\Delta t = \frac{l_x \cdot m}{100 \cdot W} \Delta q_x,$$

где  $l_x$  — размер аэроснимка;

$\Delta q_x$  — средняя величина отклонений продольного перекрытия;

$W$  — средняя скорость вертолета.

При  $l_x = 18 \text{ см}$ ;  $m = 5000$ ;  $\Delta q_x = 10\%$ ;  $W = 70 \text{ км/час}$  получим значение  $\Delta t = 4,6 \text{ сек}$ .

Для масштаба 1 : 2000 соответственно получим  $\Delta t = 2 \text{ сек}$ . В расчете принята несколько завышенная ошибка в продольном перекрытии, поскольку при съемке малых площадей некоторое уменьшение величины рабочей площади снимка не может иметь существенного значения. Ошибка же в продольном перекрытии за счет изменения путевой скорости составит (при перекрытии 60%) всего лишь

$$(\Delta q_x)_w = \frac{\pm 40 \Delta W}{W} = \frac{40 \cdot 5}{70} = 3\%.$$

Проведенные экспериментальные работы, а также приведенные выше ориентировочные расчеты позволяют считать, что аэрофотосъемка с вертолета короткими маршрутами и одиночными снимками с помощью даже полуавтоматической установки может найти применение и быть весьма эффективной.

Задача сейчас состоит в усовершенствовании аппаратуры и разработке методики съемки на базе дальнейших экспериментов.

### 3. Маршрутная съемка с вертолета

Выше мы рассмотрели вопросы использования вертолета для съемки малых площадей. Небезынтересно также рассмотреть возможности использования вертолета для съемки больших массивов в крупных и средних масштабах. Несмотря на довольно широкое распространение

вертолетов и определенные преимущества их по сравнению с самолетами, все же до последнего времени почти не было попыток применения вертолетов для аэрофотосъемки.

Главные возражения против применения вертолета можно свести к следующим: 1) дороговизне эксплуатации; 2) сильной вибрации; 3) малой устойчивости в полете.

Первое возражение едва ли следует считать серьезным. Во-первых, для удаленных от аэродромов районов стоимость эксплуатации вертолета может оказаться даже дешевле, чем самолета; во-вторых, уже в ближайшие годы вертолеты будут, по-видимому, распространены и так же доступны, как в настоящее время самолеты.

Влияние вибрации может быть без особого труда надежно компенсировано специальной амортизацией фотоустановки. Об этом убедительно свидетельствуют результаты проведенных полевых и лабораторных работ и расчеты, о которых говорилось выше. Поэтому ниже основное внимание посвящается изучению вопросов устойчивости вертолета в полете.

Для проверки устойчивости вертолета мы располагаем в настоящее время обработанными и обобщенными полевыми материалами, полученными ВНИМИ, Лабораторией аэрометодов АН СССР и Мосттранспроектом.

В 1955—1956 гг. были залетаны участки:

1) районы Вышегорода, Псковской области, в масштабах

1 : 8000, 1 : 4000 и 1 : 2000;

2) районы ж.-д. станций Сасово и Дедовичи, в масштабах

1 : 600, 1 : 500 и 1 : 400.

Масштабы 1 : 8000, 1 : 4000 и 1 : 2000. Наибольший интерес как в смысле параметров съемки, так и объема фактического материала представляют залеты района Вышегорода, поэтому внимание было сосредоточено в основном на этих материалах.

Оценка фотограмметрического качества произведена путем определения углов взаимного ориентирования и по результатам накидного монтажа.

Углы взаимного ориентирования определены на прецизионном стереометре с учетом только первых членов не менее чем по 20 парам каждого масштаба.

Продольное перекрытие определялось по накидному монтажу.

Непрямолинейность маршрутов оценивалась по формуле

$$\frac{\delta}{L} = K,$$

где  $L$  — расстояние между главными точками крайних снимков;  
 $\delta$  — максимальное отклонение центра среднего снимка от прямой, соединяющей крайние снимки.

Разномасштабность снимков получена по формуле

$$\Delta r_{a, \Delta H} \% = \left( \frac{r' - r''}{r'} \right) 100 \%.$$

Отрезки  $r'$  и  $r''$  выбирались в середине перекрытия, перпендикулярно направлению маршрута.

Показатели, характеризующие поведение вертолета в полете, сведены в табл. 3.

Таблица 3

Масштаб залета	Фокусное расстояние $f_k$	Углы взаимного ориентирования				Непрямая-линейность	Разно-масштабность, %	„Елочка“	Фотокачество
		продольные		поперечные					
		число пар	от — до, мин.	число пар	от — до, мин.				
1 : 8000	100	5	0—20	4	0—20	61—72	—	1—3	2—4
		6	20—40	6	20—40				
		4	40—60	7	40—60				
		3	60—120	1	60—120				
		2	Более 120	2	Более 120				
		6	0—20	7	0—20				
1 : 4000	100	5	20—40	2	20—40	60—68	35—44	1—4	0—5
		5	40—60	6	40—60				
		4	60—120	1	60—120				
		3	Более 120	6	Более 120				
		7	0—20	6	0—20				
		5	20—40	4	20—40				
1 : 2000	500	5	40—60	5	40—60	68—78	25—32	До 2	0—4
		6	60—120	5	60—120				
		1	Более 120	1	Более 120				
		7	0—20	6	0—20				
		5	20—40	4	20—40				
		6	40—60	5	40—60				

Продольных Поперечных

153  
165  
168142  
131  
160M 1 : 8000  
M 1 : 4000  
M 1 : 2000

Примечания: 1. Максимальные значения углов для

2. „Елочка“ в масштабе 1 : 4000 в одном случае достигает 7°.

Рассмотрение этой таблицы показывает, что фотограмметрическое и фотографическое качество материалов залетов в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним камеральной фотограмметрической обработкой.

Залетов в средних масштабах, к сожалению, не производилось, но есть все основания предполагать, что с увеличением высоты фотографирования устойчивость вертолета увеличится и фотограмметрическое качество залета еще более повысится.

**Масштабы 1 : 600, 1 : 500 и 1 : 400.** Залеты в масштабах 1 : 600, 1 : 500 и 1 : 400 дали в основном неудовлетворительное качество продольного перекрытия снимков:

Масштаб	1 : 600	менее	55%
„	1 : 500	„	45 — 65%
„	1 : 400	„	55%

Прямолинейность маршрутов выдержана в пределах 0,03—0,04, разномасштабность — в пределах 2—3%. «Елочка» доходит до 9—12°.

Углы взаимного ориентирования для снимков масштаба 1 : 500 — в пределах планового снимка или несколько превышает 3°; для залетов масштаба 1 : 600 и 1 : 400 углы взаимного ориентирования не определялись из-за малого перекрытия.

Фотографическое качество залетов хорошее.

Неудовлетворительность фотограмметрического качества может быть объяснена следующими причинами:

1) залеты в масштабах 1 : 500 и 1 : 400 производились в условиях сильной «болтанки»;

2) неправильно было рассчитано время между экспозициями;

3) недостаточная натренированность экипажа;

4) на устойчивость продольного перекрытия не могла не сказаться также высота фотографирования: для масштаба 1 : 600 с  $f = 100$  мм она равна всего лишь 60 м, что может вызвать погрешность перекрытия при колебании высоты на  $\pm 10$  м:

$$(\Delta q)_H = \frac{40\Delta H}{H} = 7\%;$$

5) возможна, наконец, недостаточная точность работы командного прибора. В самом деле, чтобы выдержать среднюю величину отклонений продольного перекрытия в границах 10%, ошибка интервала времени между экспозициями не должна превышать значений, указанных в табл. 4.

Таблица 4

Скорость вертолета, км/час	Ошибка интервала времени между экспозициями при масштабах залета, сек.		
	1 : 600	1 : 500	1 : 400
70	0,54	0,45	0,38
150	0,26	0,22	0,28

Командные приборы импульсного типа, установленные на АФА, КМК, сохраняют заданный интервал только с точностью  $\pm 0,5$  сек., поэтому только за счет этого фактора погрешность продольного перекрытия может достигать:

для масштаба	1:500	при	70 км/час	—	11%
"	"	"	70	"	— 13%
"	"	"	150	"	— 19%
"	"	"	150	"	— 22%
"	"	"	150	"	— 28%

В нашем случае имела место, по-видимому, и систематическая ошибка интервала времени (перекрытие во всех случаях меньше нормального).

Таким образом, для получения снимков приемлемого фотограмметрического качества при масштабах залета 1:600 — 1:400 главное требование, которое должно быть строго соблюдено, — это устойчивость интервала времени между экспонированиями.

При ошибке интервала 0,1—0,2 сек. и путевой скорости вертолета порядка 70—80 км/час можно ожидать вполне удовлетворительного результата.

\* \*  
\* \*

Проведенные пока еще незначительные по объему исследования дали некоторые интересные результаты и показали, как заманчива перспектива применения вертолета для получения аэроснимка надлежащего качества.

#### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Келль Л. Н. Узловые точки в фотограмметрии. Докторская диссертация. Фонды ЛГИ, 1953.
2. Шершень А. И. Аэрофотосъемка. Лентосъемочный процесс. Геодезиздат, 1949.
3. Брустин Б. И., Гилев С. С., Семенов В. С., Юцевич Ю. К. Аэрофотооборудование самолетов. Изд. ЛКВВИА, 1948.