Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVII, вып. 1, 1975 г.

АВТОРЕДУКЦИОННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ОТВЕС С ЖИДКОСТНОЙ ЛИНЗОЙ

Н. А. Гусев

(Ленинградский горный ин-т)

Современные оптические теодолиты обычно снабжаются расположенными на алидадной части или на подставке оптическими отвесами, которыми пользуются для центрирования теодолита над вершиной измеряемого горизонтального угла. Оптический отвес имеет несомненные преимущества перед обычным шнуровым, но не лишен и недостатка. Центрирование прибора оптическим отвесом состоит из последовательно выполняемых операций: нивелирования, центрирования, опять нивелирования, так как оно нарушается после центрирования, опять центрирования и т. д. Эти нудные и утомительные операции исключаются, если оптический отвес снабдить авторедукционным компенсатором, которым линия визирования зрительной трубки отвеса автоматически устанавливается вертикально.

В теодолитах и нивелирах в основном применяются авторедукционные компенсаторы (стабилизаторы) оптико-механического типа. Для оптического отвеса они не пригодны, так как имеют относительно большие размеры и не могут быть вмонтированы во втулку алидадной части теодолита или трегера.

Для оптического отвеса может быть использован компенсатор оптического типа с жидкостным клином [1] или с жидкостной линзой [3]. Жидкостные компенсаторы малы по размерам, а по точности вполне пригодны для отвеса. Компенсатор с жидкостной линзой может быть рекомендован для оптического отвеса не только теодолита, но и самостоятельного прибора, которым пользуются для центрирования над пунктами триангуляции и полигонометрии при линейных измерениях.

Компенсатор с жидкостной линзой представляет собой стеклянную цилиндрическую ампулу, заполненную прозрачной жидкостью *2*, которая как и в круглом уровне дает газовый пузырек. Донышком ампулы является плоско-параллельная пластинка *3* или линза, а крышкой — линза *1*, обращенная вогнутой поверхностью вниз (рис. 1, *а*). Жидкость в ампуле дает отрицательную линзу, ограниченную сверху сферической поверхностью пузырька, а снизу поверхностью плоско-параллельной пластинки или линзы.

Теория компенсатора. Пусть ампула занимает горизонтальное положение: ее ось $L\,L'$ вертикальна. Тогда точка C, соответствующая середине пузырька, совместится с нульпунктом O ампулы, а оптическая ось системы из жидкостной линзы *2* и стеклянной линзы *1* совпадет с осью $L\,L'$ ампулы и отвесной линией $V\,V'$.

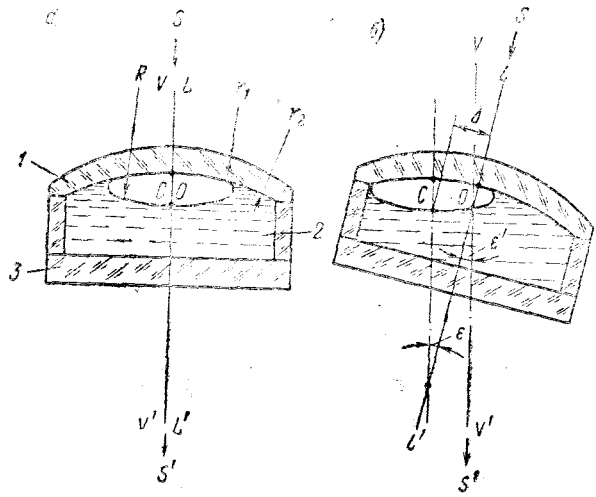


Рис. 1. Ампула жидкостного компенсатора

Направим на ампулу луч света S, совпадающий с осью $L\,L'$. Луч S пройдет через систему ампулы и выйдет из нее по направлению S', совпадающему с вертикальной линией $V\,V'$.

Наклоним ампулу на малый угол ε (рис. 1, *б*). Пузырек в ней сместится на величину

$$\Delta = r_2 \frac{\varepsilon}{\rho}, \tag{1}$$

луч света S претерпит преломление через жидкостную линзу и отклонится на малый угол

$$\varepsilon' = \frac{\Delta}{f_{ж}} \rho, \tag{2}$$

где $f_{ж}$ — фокусное расстояние жидкостной линзы; r_2 — радиус кривизны внутренней поверхности линзы *1*; ρ — радиан в угловой мере, равный 206 265″.

Подставив в формулу (2) значение Δ из выражения (1), получим

$$\varepsilon' = \frac{r_2}{f_{ж}} \varepsilon. \tag{3}$$

Чтобы жидкостная линза отвечала требованиям автоматической стабилизации визирной линии отвеса, она должна скомпенсировать угол ε наклона ампулы так, чтобы луч S' оказался вертикальным. Очевидно, это произойдет при условии равенства углов ε и ε′. Заменив в формуле (3) угол ε′ на ε, получим соотношение параметров

$$1 = \frac{r_2}{f_{ж}} \quad \text{или} \quad f_{ж} = r_2, \tag{4}$$

которому должен подчиняться компенсатор с жидкостной линзой, автоматически стабилизирующий линию визирования отвеса в вертикальном положении. Отсюда следует, что фокусное расстояние $f_{ж}$ жидкостной линзы компенсатора должно равняться радиусу кривизны r_2 нижней поверхности линзы *1*.

Определим радиус кривизны жидкостной линзы R по известной из геометрической оптики формуле

$$\frac{1}{f_ж} = (n_ж - 1)\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r_3}\right) + \frac{(n-1)^2}{n} \cdot \frac{d}{Rr_3}, \tag{5}$$

где $n_ж$ — показатель преломления жидкости; d — толщина жидкостной линзы по ее оси; R, r_3 — радиусы кривизны, соответственно, верхней и нижней поверхностей жидкостной линзы.

Снизу жидкостная линза ограничена плоско-параллельной пластинкой, поэтому $r_3 = \infty$, и тогда

$$\frac{1}{f_ж} = (n_ж - 1)\frac{1}{R}.$$

Отсюда

$$R = (n_ж - 1) f_ж. \tag{6}$$

Компенсатор с жидкостной линзой устанавливается в системе оптического отвеса, которая является телескопической, в параллельном ходе лучей света, т. е. перед объективом зрительной трубки. Поэтому, чтобы не нарушать телескопичность трубки, система компенсатора должна иметь оптическую силу Ф, равную нулю:

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_ж - d' \Phi_c \Phi_ж = \frac{1}{f_c} + \frac{1}{f_ж} - \frac{d'}{f_c f_ж} = 0, \tag{7}$$

где Φ_c, $\Phi_ж$ — оптические силы, соответственно, линзы *1* и жидкостной линзы; f_c — фокусное расстояние линзы 1; d' — толщина пузырька по его оси.

По сравнению с радиусами кривизны линз d' мала, поэтому ею можно пренебречь.

Подставив в формулу (7) значения: $\frac{1}{f_ж}$ из выражения (4), равное $\frac{1}{r_2}$, $\frac{1}{f_c} = (n_c - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$ и $\frac{d'}{f_c f_ж} = 0$, получим

$$(n_c - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{1}{r_2} = \frac{n_c - 1}{r_1} - \frac{n_c}{r_2} = 0, \tag{8}$$

удовлетворяющую требованиям сохранения телескопичности зрительной трубки отвеса.

Формулы (8) и (6) являются основными для расчетов компенсатора с жидкостной линзой, работающего в параллельном ходе лучей света.

Численное значение r_2 выбирается, чтобы чувствительность компенсатора, который практически является круглым уровнем, соответствовала точности центрирования теодолита. Приняв ошибку центрирования Δa равной 0,2 (рис. 2), а высоту h теодолита над вершиной измеряемого угла порядка 1,2 *м*, получим угловую ошибку центрирования

$$\Delta \varepsilon' = \frac{\Delta a}{h} \rho \approx 0{,}6'. \tag{9}$$

Этой ошибке соответствует величина схода пузырька

$$\Delta l = \frac{\Delta \varepsilon'}{\rho} r_2 = \frac{\Delta a}{h} r_2, \tag{10}$$

которая и характеризует чувствительность компенсатора. Приняв ее равной 0,1 *мм*, вычислим: по формуле (10) $r_2=600$ *мм*, по равенству (4) $f_ж=600$ *мм* и по выражению (6) $R=600\ (n_ж-1)$ *мм*.

Сложнее подобрать жидкости с соответствующими для компенсатора значениями показателя преломления, вязкости и поверхностного натяжения. Однако решение этой задачи облегчается тем, что пучок лучей, проходящий через жидкость, исходит из отверстия малого диаметра, например, в оптическом теодолите Т2 [2] диаметр зрачка входа объектива трубки отвеса равен 5,5 *мм*. Чем меньше световое отверстие объектива, тем короче длина пузырька и тем проще подобрать жидкость с соответствующим радиусом R.

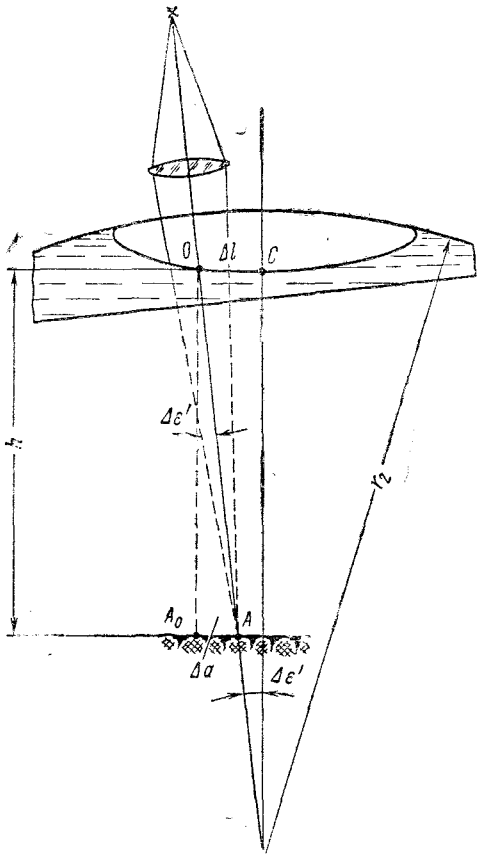


Рис. 2. Схема центрирования

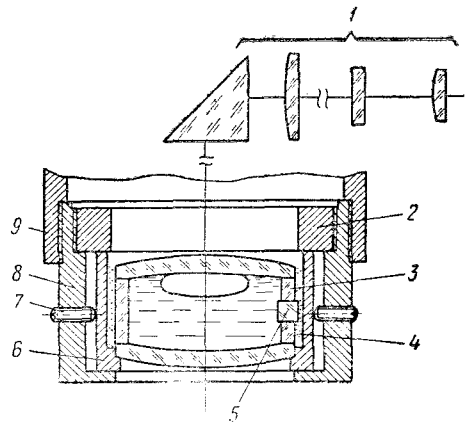


Рис. 3. Схема оптики авторедукционного отвеса с жидкостной линзой

Варианты отвесов с жидкостной линзой. Компенсатор авторедукционного отвеса (рис. 3) может быть рекомендован для теодолита. Он годен для оптического отвеса *1*, расположенного на алидаде горизонтального круга или на подставке (трегере). Ампула *3* компенсатора, закрепленная гипсом *4* в металлической оправе *6*, находится в патроне *8*, с которым она жестко соединена резьбовым кольцом *2*. Патрон соединяется с торцевой частью втулки алидады или трегера *9*. На патроне имеются четыре винта *7*, которыми юстируется ампула компенсатора: нульпункт ампулы совмещается с вертикальной осью вращения алидады горизонтального круга. Ампула заполняется жидкостью через отверстие, которое наглухо закрывается притертой пробкой *5* из стекла и заклеивается лентой из пластиката.

На рис. 4 показаны два варианта оптического отвеса с жидкостными линзами, предназначенные для центрирования трегера без теодолита. Отвесы отличаются тем, что в одном (рис. 4, *а*) нивелирование производится при помощи круглого уровня *1*, соединенного с трубой отвеса, а в другом (рис. 4, *б*) при помощи компенсатора, ампула которого одновременно является и круглым уровнем. Пузырек компенсатора уровня и круговая риска, нанесенная на верхней поверхности

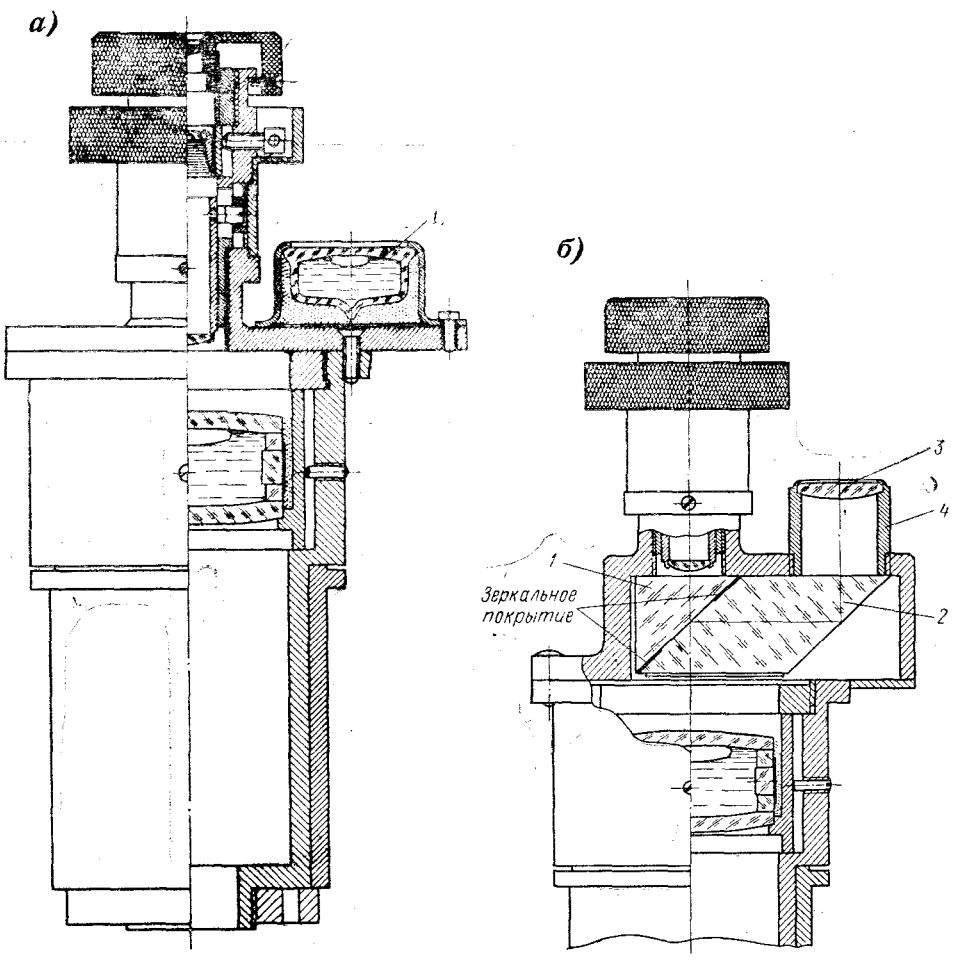


Рис. 4. Варианты авторедукционных отвесов с жидкостными компенсаторами

линзы ампулы, рассматриваются через лупу *3*, оправа которой *4* прикреплена к трубке отвеса. Изображение пузырька и риски передается в поле зрения лупы при помощи ромбической призмы *2*, склеенной с прямоугольной призмой *1*. На призме *2* в плоскости склейки нанесено зеркальное покрытие, которое ограничивает поле зрения трубки отвеса. На зеркальное покрытие падают лучи от круговой риски и от краев пузырька, когда он находится в середине. После отражения от второй грани ромбической призмы лучи попадают в лупу и в глаз наблюдателя. Через среднюю часть призмы, не имеющую зеркального покрытия, проходят лучи света, преломленные жидкостной линзой компенсатора. Эти лучи, стабилизированные жидкостной линзой, попадают в объектив трубки отвеса и далее в окуляр.

Авторедукционный компенсатор с жидкостной линзой, впервые примененный в нивелире технической точности [3] и рекомендуемый для оптического отвеса, является оригинальным и наиболее рациональным из всех известных компенсаторов для указанных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев Н. А. Маркшейдерско-геодезические инструменты и приборы. Недра, 1968.
2. Захаров А. И., Зуйков И. И. Теодолиты средней точности и оптические дальномеры. Недра, 1965.
3. Drodofsky M. Zeitschrift für Vermessungs. H. 4, 1963.