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 ЖИДКОСТНЫЙ И ПРУЖИННЫЙ КОМПЕНСАТОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В МАРКШЕЙДЕРСКО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ

Н. А. Гусев

(Ленинградский горный ин-т)

Авторедукционные компенсаторы последние 10—15 лет применяются во многих маркшейдерско-геодезических приборах новых конструкций. Они значительно улучшают технологию производства съемочно-измерительных работ, повышают производительность труда и увеличивают точность. Авторедукционные компенсаторы широко применяются в нивелирах, реже в теодолитах и совсем редко в оптических отвесах. В нивелирах они используются для автоматической установки линии визирования в горизонтальном положении, в оптических отвесах в вертикальном, в теодолитах — для редуцирования места нуля вертикального круга. Из трех типов имеющихся компенсаторов: механического, оптико-механического и оптического в маркшейдерско-геодезических приборах преобладает второй тип. Механический тип компенсатора теперь не применяется, оптический используется редко.

Авторедукционная часть оптико-механического и оптического компенсаторов состоит из чувствительного и оптического элементов. В оптико-механическом компенсаторе чувствительный элемент (датчик) и оптический являются отдельными компонентами компенсатора, а в оптическом компенсаторе датчиком служит оптический элемент.

В оптико-механическом компенсаторе датчиком могут быть тонкие (обычно металлические) нити, ленточки или эластичные пружины, которые при изгибе работают без трения, и редко шарнирные маятники. С датчиком соединяется оптический элемент: призма полного внутреннего отражения, плоское зеркало или линза. Датчиком, работающим под действием силы тяжести, оптический элемент устанавливается так, чтобы автоматически редуцировать геометрический элемент прибора (визирную линию нивелира и оптического отвеса, место нуля вертикального круга теодолита).

В оптических компенсаторах датчиком и оптическим элементом является жидкость, которая в зависимости от формы сосуда-ампулы и его наклона может давать плоско-параллельную пластинку, оптический клин, линзу или призму полного внутреннего отражения.

В авторедукционных нивелирах применяются преимущественно оптико-механические компенсаторы, обычно расположенные внутри и редко вне трубы. Нивелиры с компенсатором в трубе имеют малый вес и габариты, удобны в работе и надежны при транспортировке. Их недостаток — относительно небольшие углы стабилизации и влияние

перефокусировки зрительной трубы с телеобъективом на точность стабилизации визирной линии. От этого недостатка свободны авторедукционные нивелиры с компенсатором, расположенным вне трубы.

В настоящей статье дается анализ оптико-механического пружинного и оптического жидкостного компенсатора и приводятся рекомендации для применения их в маркшейдерско-геодезических приборах.

Оптический компенсатор с жидкостным клином представляет собой цилиндрическую ампулу с небольшим количеством прозрачной жидкости, которая может давать плоско-параллельную пластинку или оптический клин с преломляющим углом, равным углу наклона прибора с ампулой. В нивелире и оптическом отвесе компенсатор устанавливается в параллельном ходе лучей света, которые жидкостным клином отклоняются на угол

$$\varepsilon = 2\Theta\,(n-1),$$

где Θ — угол наклона прибора; n — показатель преломления жидкости [3].

Визирные линии зрительной трубы нивелира и отвеса стабилизируются при условии равенства углов ε и Θ, а следовательно, при $n=1{,}5$.

Жидкость компенсатора одновременно является датчиком и оптическим элементом — клином с переменным углом преломления. Механического элемента компенсатор не имеет, поэтому точность стабилизации визирной линии обусловливается только показателем преломления, который в свою очередь зависит от температуры.

Так, при температуре t_1 жидкостный клин изменит направление линии визирования на угол

$$\varepsilon_1 = 2\varepsilon\,(n_1 - 1), \qquad (1)$$

а при t_2 на угол

$$\varepsilon_2 = 2\varepsilon\,(n_2 - 1), \qquad (2)$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления, соответственно, при температурах t_1 и t_2.

Из соотношений (1) и (2) получаем

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 2\varepsilon\,(n_1 - n_2), \text{ или } \Delta\varepsilon = 2\varepsilon\Delta n\Delta t, \qquad (3)$$

где $\Delta\varepsilon$ — ошибка в изменении направления линии визирования; Δn — изменение показателя преломления при изменении температуры жидкости на 1° С (для жидкости, используемой в компенсаторе, $\Delta n=0{,}0004$); Δt — разность температур.

Определим температурный диапазон работы жидкостного компенсатора, у которого предельные углы стабилизации визирной линии $\varepsilon=\pm 10'$ и ошибка стабилизации $\Delta\varepsilon$ не более $\pm 1''$ (эти допуски соответствуют современным точным авторедукционным нивелирам).

По формуле (3) получаем

$$\Delta t = \frac{\Delta\varepsilon}{2\varepsilon\Delta n} \approx 2^\circ. \qquad (4)$$

В практике нивелирные работы производятся при значительно больших отклонениях температуры. Чтобы избежать ошибок $\Delta\varepsilon$ более $1''$, нивелир следует устанавливать в рабочее положение точнее. Так, например, при $\Delta t=10\sim 15^\circ$ прибор надо нивелировать с ошибкой

$$\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{2\Delta n\Delta t} \approx 2'. \qquad (5)$$

Такую точность установки нивелира можно получить при помощи круглого уровня, но она не удовлетворяет техническим требованиям ГОСТ 10528—63. Поэтому жидкостный компенсатор не может применяться в нивелирах.

Положительным качеством жидкостного компенсатора является простая и надежная конструкция, не требующая демпфирующего устройства. В отличие от других типов жидкостный компенсатор дает вертикальную линию для визирования в надир и в зенит, поэтому он может найти широкое применение в оптических отвесах, которые инженерной геодезией используются: 1) для центрирования теодолита над вершиной измеряемого горизонтального угла, 2) передачи координат при строительстве высотных зданий *, 3) наблюдений за деформациями плотин гидротехнических сооружений. Требования к точности стабилизации визирной линии авторедукционного отвеса с жидкостным компенсатором могут быть снижены в первом случае до 8—10″, а во втором до 2″. Такая точность стабилизации дает ошибку центрирования теодолита порядка 0,05 *мм*, ошибку передачи координат на высоту 100 *м* порядка 1 *мм*. Чтобы обеспечить эту точность, надо нивелировать отвес с ошибкой не более 5′ при температуре, отличающейся от нормальной ($\pm 10^\circ$ C), для которой справедлив показатель преломления жидкости $n = 1{,}5$.

В третьем случае при расположении отвеса в теле плотины (патерне), где изменения температуры незначительны, точность стабилизации визирной линии не снижается даже при грубой его нивелировке с ошибкой $\pm (5—10)'$.

Оптико-механический пружинный компенсатор впервые применила фирма Эртеля (ФРГ) в инженерном и строительном нивелирах. Компенсатор расположен в зрительной трубе между сеткой и фокусировочной линзой. Он представляет собой две тонкие плоские пружины, консольно закрепленные нижними концами в корпусе компенсатора, который соединен с трубой, а верхними в оправе прямоугольной призмы [3]. Пружины при продольном наклоне трубы изгибаются и наклоняют призму. При этом призма направляет горизонтальный луч визирования в поле зрения окуляра на сетку. Автоматическая стабилизация линии визирования получается при условии

$$f = l\,(2k - 1), \tag{6}$$

где f — эквивалентное фокусное расстояние телеобъектива зрительной трубы; l — расстояние от точки падения луча визирования на гипотенузную грань призмы до сетки; k — коэффициент механической стабилизации [4], который определяется по формуле

$$1 + k = \frac{1}{\cos\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right) - s\sqrt{\frac{P}{EI}}\sin\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)}. \tag{7}$$

Здесь S — длина пружины; P — нагрузка на пружину; E — модуль упругости материала пружины; I — момент инерции; s — расстояние от центра тяжести нагрузки до точки защемления пружины в оправе призмы.

Инженерный нивелир рекомендуется устанавливать в рабочее положение с ошибкой не более $\pm 4'$ по круглому уровню, цена деления которого 8′. Углы стабилизации визирной линии и точность компенса-

* Зенитпроектиры ОЦП и PZL, применяющиеся для этой цели, стабилизируют линию визирования не по вертикали.

тора ограничиваются следующими основными факторами: 1) изменением расстояния l от сетки до призмы при изгибе пружины; 2) изменением фокусного расстояния телеобъектива при перефокусировке трубы на разные расстояния визирования; 3) непостоянством коэффициента механической стабилизации для различных углов наклона трубы.

Автором предложен авторедукционный нивелир с пружинным компенсатором НПК [2], свободный от указанных недостатков, позволивший во много раз увеличить угол стабилизации визирной линии. Компенсатор расположен в параллельном пучке лучей света над объективом перископической зрительной трубы. В отличие от компенсатора нивелира Эртеля пружины в нем консольно закреплены в корпусе не нижними, а верхними концами. К нижним концам пружин прикреплена оправа с плоским зеркалом. Автоматическая стабилизация визирной линии подчинена иному, чем в нивелире Эртеля, условию

$$\varepsilon = 2\varepsilon k \text{ или } k = 0{,}5, \tag{8}$$

где ε угол наклона нивелира в направлении линий визирования; k — коэффициент механической стабилизации, определяемый по формуле

$$1 - k = \frac{1}{\operatorname{ch}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right) + s\sqrt{\frac{P}{EI}}\operatorname{sh}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)}. \tag{9}$$

Здесь ch и sh — гиперболические косинус и синус.

В формулу (8) не входят значения f и l, поэтому зависящих от них ошибок компенсатор не имеет. Кроме того, коэффициент k в 6 раз меньше, чем в нивелире Эртеля, поэтому углы стабилизации, которые зависят от величины угла изгиба пружины, могут быть во много раз больше. Угол стабилизации визирной линии нивелира НПК $\pm 30'$, а ошибка стабилизации не более $1''$.

Для компенсатора используется специальная стальная пружина сечением $1{,}5 \times 0{,}08$ *мм* со стабильным модулем упругости. Перископическая зрительная труба позволяет пользоваться нивелиром с оптической насадкой для двустороннего визирования и расширить круг его применения нивелированием на местности с неустойчивой почвой [6].

Чтобы установить соответствие пружинного компенсатора требованиям, предъявляемым нормами геометрического нивелирования IV и III классов, проведем анализ его ошибок.

Точность пружинного компенсатора зависит от стабильности коэффициента k, подчиненного соотношению (9), в котором значения S, E, I и P могут изменяться вследствие непостоянства внешних условий.

Компенсатор нивелира НПК имеет нагрузку на одну пружину $P = 0{,}022$ *кГ*, модуль упругости пружины $E = 2 \cdot 10^6$ *кГ/см*^{2}, момент инерции пружины $I = \frac{ab^3}{12} = \frac{0{,}15 \cdot 0{,}008^3}{12} = 64 \cdot 10^{-10}$ *см*^{4} и $s = 1{,}1$ *см*.

Определим длину S пружины для указанных значений E, I, P, s и $k = 0{,}5$. Для этого зададимся рядом последовательных значений S и по формуле (9) вычислим соответствующие коэффициенты *:

S	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
a	0,3933	0,5244	0,6555	0,7866	0,9177

* Для краткости написания обозначим $S\sqrt{\frac{P}{EI}}$ через a; $s\sqrt{\frac{P}{EI}}$ через b.

$\operatorname{ch}\sqrt{\frac{P}{EI}}$	1,0783	1,1407	1,2226	1,3256	1,4515
$b\operatorname{sh}\sqrt{\frac{P}{EI}}$	0,5820	0,7914	1,0145	1,2551	1,5172
$\operatorname{ch}\sqrt{\frac{P}{EI}}+b\operatorname{sh}\sqrt{\frac{P}{EI}}$	1,6603	1,9321	2,2371	2,5807	2,9687
k	0,398	0,482	0,553	0,612	0,663

По полученным данным интерполированием определим S, соответствующее $k=0{,}5$,

$$S = 0{,}4 + \frac{0{,}1 \cdot 0{,}18}{0{,}71} = 0{,}42\ см.$$

Расчетная длина S пружины не будет точно соответствовать действительной, так как принятые при расчетах значения E и I не являются фактическими. Поэтому коэффициент k доводится до соответствующей точности при юстировке компенсатора с помощью дополнительной нагрузки Δp.

На стабильность коэффициента пружинного компенсатора влияют температура и сила тяжести, которая для разных широт неодинакова. Проанализируем, насколько эти факторы ограничивают область применения нивелира.

Определим ошибку $d\varepsilon_1'$ стабилизации линии визирования для предельных углов наклона нивелира $\varepsilon = \pm 30'$, возникающую при отклонении температуры от нормальной, которой соответствует коэффициент компенсации $k=0{,}5$, на $\Delta t = \pm 40°\,\mathrm{C}$.

Под влиянием температуры могут изменяться длина пружины и модуль упругости, а следовательно и коэффициент k.

1. Дифференцированием уравнения (9) по переменной найдем

$$dk_1 = \frac{\operatorname{sh}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right) + s\sqrt{\frac{P}{EI}}\operatorname{ch}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)}{\left[\operatorname{ch}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right) + s\sqrt{\frac{P}{EI}}\operatorname{sh}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)\right]^2} dS. \qquad (10)$$

Подставив вычисленные числовые значения членов, входящих в правую часть этого уравнения, получим

$$dk = 0{,}306 \cdot dS, \qquad (11)$$

где dS — величина изменения длины пружины.

Коэффициент компенсации

$$k = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon},$$

где ε' — угол стабилизации (приведения к горизонту линии визирования).

Отсюда

$$dk = \frac{d\varepsilon_1'}{\varepsilon}. \qquad (12)$$

Подставим в формулу (11) вместо dk его значение $\frac{d\varepsilon_1'}{\varepsilon}$. Получим

$$d\varepsilon_1' = 0{,}306\,\varepsilon dS = 0{,}306\varepsilon\beta\Delta t, \qquad (13)$$

где β — коэффициент линейного расширения пружины.

Подставим в формулу (13) числовые значения $\Delta t=40°$; $\beta=12\cdot10^{-6}$ и $\varepsilon=30'$. Получим ошибку стабилизации линии визирования для предельных углов наклона нивелира $d\varepsilon'_{max}=0{,}26''$, которая в несколько раз меньше технического допуска, предусмотренного ГОСТ 10528—63.

2. Дифференцированием уравнения (9) по переменной dE определим

$$dk_2=\frac{\sqrt{\frac{P}{EI}}\left[\operatorname{sh}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)(S+s)+Ss\sqrt{\frac{P}{EI}}\operatorname{ch}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)\right]}{2E\left[\operatorname{ch}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)+s\sqrt{\frac{P}{EI}}\operatorname{sh}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)\right]^2}dE. \quad (14)$$

Подставив числовые значения членов, входящих в правую часть уравнения, получим

$$dk_2=129\cdot10^{-9}dE$$

или, с учетом равенства (12),

$$\frac{d\varepsilon'_2}{\varepsilon}=129\cdot10^{-9}dE.$$

Отсюда

$$d\varepsilon'_2=129\cdot10^{-9}\varepsilon dE. \quad (15)$$

Модуль упругости при изменении температуры от 0 до $\pm40°$C изменяется примерно на 0,001%. Следовательно, $dE=2\cdot10^3$ и из формулы (15) получаем $d\varepsilon'_{max}=0{,}45''$.

Эта ошибка мала и удовлетворяет требованиям ГОСТ 10528—63.

3. Для определения ошибки стабилизации линии визирования, возникающей от изменения силы тяжести, продифференцируем уравнение (9) по переменной P

$$dk_3=\frac{\operatorname{sh}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)(S+s)+Ss\sqrt{\frac{P}{EI}}\operatorname{ch}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)}{2\sqrt{EIP}\left[\operatorname{ch}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)+s\sqrt{\frac{P}{EI}}\operatorname{sh}\left(S\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)\right]^2}dP. \quad (16)$$

Заменив члены в правой части уравнения вычисленными числовыми значениями, получим

$$dk_3=11{,}686dP$$

или, с учетом равенства (12),

$$\frac{d\varepsilon'_3}{\varepsilon}=11{,}686\,dP.$$

Отсюда

$$d\varepsilon'_3=11{,}686\varepsilon dP. \quad (17)$$

Сила тяжести в пределах широт материковой части СССР ($\sim35°$ $\sim75°$) изменяется на 0,31% [7].

Коэффициент компенсации k доводится до значения 0,5 юстировкой нивелира при его изготовлении. Если завод находится на средней широте Советского Союза, например, 60° (Ленинград) или 50° (Харь-

ков, Киев), то сила тяжести в первом случае изменится на 0,22% (наибольшее изменение), во втором — на 0,13%. Соответственно нагрузка на пружину, равная 0,022 *кГ*, претерпит наибольшее изменение $dP = 484 \cdot 10^{-7}$ и $dP = 286 \cdot 10^{-7}$.

Подставив в формулу (17) вычисленные числовые значения ε и dP, получим

$$d\varepsilon'_{max} = 1{,}02'' \text{ и } d\varepsilon'_{max} = 0{,}60''.$$

Такие ошибки допустимы не только для технического, но и для точного (IV, III классы) нивелирования.

Итак, пружинный компенсатор нивелира НПК обеспечивает высокую точность стабилизации визирной линии при значительных колебаниях температуры и в широком диапазоне широт. Такую же точность компенсатор может дать и при работе в широтах меньше 35°, следует лишь уменьшить угол ε, для чего нивелир на станции надо устанавливать в рабочее положение с ошибкой порядка 20—15′.

Ошибки в положении линии визирования нивелира НПК могут возникать от теплового воздействия на прибор в целом. По своему характеру они являются такими же, что и в уровенных нивелирах. По исследованиям Центрального научно-исследовательского института инженеров геодезии, аэросъемки и картографии, эти ошибки могут быть порядка 0,5″ на 1°С изменения температуры.

Нивелиром НПК можно пользоваться в комплекте со специальной насадкой двустороннего визирования [5], которая улучшает технологию нивелирования, увеличивает производительность труда нивелировщика и практически исключает ошибку, возникающую от теплового влияния на прибор [6]. Нивелир с насадкой может быть рекомендован для прокладки ходов на местности как с неустойчивой, так и устойчивой почвой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борздыка А. И. Зависимость модуля упругости от температуры. Вестник машиностроения, 1948, № 2.
2. Гусев Н. А. Авторедукционный нивелир. Авт. свид. № 144613. 1961. Бюлл. № 3, 1962.
3. Гусев Н. А. Маркшейдерско-геодезические инструменты и приборы. Недра, 1968.
4. Гусев Н. А. Маркшейдерско-геодезические приборы и инструментоведение. Углетехиздат, 1958.
5. Гусев Н. А. Нивелир с двусторонней линией визирования. Авт. свид. № 266237, 1968. Бюлл. № 11, 1970.
6. Гусев Н. А. Опытный образец авторедукционного нивелира с двусторонней линией визирования. Геодезия и картография, 1971, № 6.
7. Путилов К. А. Курс физики. Т. 1. Гостехтеоретиздат, 1956.
8. Справочник геодезиста. Под ред. В. Д. Большакова и Г. П. Левчука. Недра, 1966.