

Д. И. МАСЛИЧ, канд. техн. наук, З. Ф. ПАТОВА
Львовский политехнический институт

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОТ ВЛИЯНИЯ РЕФРАКЦИИ И ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ВЫСОКОТОЧНОМ НИВЕЛИРОВАНИИ

За последние 80 лет выведено большое количество формул для определения поправок за рефракцию [1—3, 5, 6], каждая из которых в какой-то степени исправляла результаты нивелирования, выполненные авторами, оставаясь, однако, непригодной для исправления других нивелировок. Так, формула Лаллемана и Красовского может быть использована только при таких условиях стратификации атмосферы, когда слои разных плотностей параллельны к подстилающей поверхности [6], что бывает очень редко и недолго; формула Павлова дает поправки в пять-шесть раз большие, чем ошибки [6]; формула Татевяна исправляет результаты нивелирования примерно на 40%, причем не стабильно; наилучшее исправление результатов нивелирования (примерно на 70%) дает применение формулы Куккамяки [7].

Наличие такого количества формул уже само по себе свидетельствует о сложности исследуемой проблемы. Поскольку же ни одна из формул не решает полностью вопроса об учете ошибок рефракции, то естественно предположить, что существуют другие источники ошибок, дающие соразмерные или даже несколько большие ошибки, которые, тесно переплетаясь с ошиб-

ками рефракции, увеличивают или ослабляют в зависимости от состояния источников суммарное влияние ошибок.

Исследования ЦНИИГАиК 1953—1955 гг. [6] показали, что результаты нивелирования в большей степени искажены ошибками от влияния тепловых воздействий на нивелир.

Работы, выполненные в 1955—1972 гг. [4], полностью подтвердили это. Однако степень взаимодействия и учет влияния достаточно не исследованы до настоящего времени.

Мы попытались разобраться в условиях, способствующих накоплению или компенсации суммарных ошибок, и изыскать возможности для учета их в высокоточном нивелировании.

В настоящее время высокоточное нивелирование ведется не только в стандартных, но и в специфических условиях: по коротким ходам или небольшим полигонам, расположенным в горных районах с затяжными односторонними уклонами линий, в закрытой или застроенной местности. Эти условия способствуют появлению значительных по значению погрешностей.

Прежде всего отдельные превышения (h) на станциях будут содержать в себе погрешности за рефракцию, связанные с фактическим распределением температурного градиента (Δt) с высотой (z). Выполненные нами продолжительные экспериментальные измерения температур на разных высотах, их обработка и анализ показали, что наиболее близко к реальному изменению температуры (t) с высотой описывается формулой

$$t = a + bz^c, \quad (1)$$

где a , b и c — коэффициенты, получаемые при обработке материалов по измерению температуры на разных высотах в приземном трехметровом слое.

Погрешности за рефракцию могут быть как случайными, так и систематическими короткого периода действия. Последние в течение дня несколько раз изменяют знак и до некоторой степени компенсируются. В суммах превышений за день или нескольких дней работы остается суммарное накопление не скомпенсированных короткопериодических погрешностей, которые зависят от среднестатистического хода Δt .

Поскольку из-за изменчивости Δt трудно предложить практически приемлемую методику, исключающую погрешности рефракции, можно обратиться к методу введения поправок. Из существующих формул наиболее подходящей для этой цели является формула Куккамяки [1, 2], так как она выведена на основании температурного уравнения (1), хорошо отображающего распределение Δt с z

$$\delta h_r = d \frac{s^2}{(z_0 - z_1)^2} \cdot \frac{t_2 - t_1}{z_2^c - z_1^c} \left\{ \frac{1}{c + 1} (z_1^{c+1} - z_2^{c+1}) - z_0^c (z_1 - z_2) \right\}, \quad (2)$$

или интерполяционная формула

$$\delta h_r = 10^{-5} \gamma \left(\frac{s}{50} \right)^2 (t_2 - t_1) \cdot h, \quad (3)$$

где

$$\gamma = \frac{0,594}{250^c - 50^c} \left\{ \frac{1}{c+1} (50^{c+1} - 250^{c+1}) - 150^c \cdot 200 \right\};$$

δh_r — поправка за влияние рефракции; d — изменение воздушной рефракции, соответствующее разности температур в 1°C ($d \approx 0,893 \times 10^{-6}$); s — расстояние до реек; t_1 и t_2 — температуры на высотах z_1 и z_2 ; z_0 — высота инструмента; h — превышение; c — постоянный параметр из уравнения (1).

Для проверки возможности введения поправок использованы материалы специального нивелирования на двух участках «Куты» и «Поляки», произведенного нами во Львовской области в 1963—1964 гг.

На участке «Куты» одно и то же превышение между двумя грунтовыми реперами, расположенными на расстоянии 100 м, равное 2198 мм, определяли каждый час в течение светлых периодов восьми дней. Длина луча 50 м, направление нивелирования «юг-север», нивелир НА-1 защищали только зонтом. Одновременно возле инструмента производили температурные измерения на высотах 0,5 и 2,5 м над землей. Измеряли также давление на высоте 1 м и скорость ветра на высоте 1,5 м.

На участке «Поляки» использовали ту же методику наблюдений. Превышение равно 2347 мм; наблюдения вели четыре дня. Основное принципиальное различие работы на этом участке состояло в том, что нивелирование вели одновременно двумя нивелирами НА-1 (один находился под зонтом, а второй — в термозащитном кожухе и под зонтом-навесом [4]), а направление нивелирования было «запад-восток». Вероятнейшее превышение (h_0) на каждом из участков получали как среднее соответственно из восьми и четырех дней нивелирования коротким (25 м) лучем в прямом и обратном направлениях.

Каждое превышение, полученное как из нивелирования длинным, так и коротким путем, исправлено поправками за компарирование реек и за разность температур при компарировании и нивелировании.

После этого во все часовые превышения нивелирования длинным лучем введены поправки за рефракцию по формуле Куккамьяки, редуцированной на соответствующую широту и на среднюю высоту инструмента над землей.

Результаты нивелирования для каждого дня в отдельности и для всех дней до и после введения поправок за рефракцию (δh_r) оценены по трем критериям: а) по колебаниям h за каждый день и за весь период работы на участке; б) по систематическим ошибкам на одну станцию; в) по средним квадратическим случайным ошибкам на одну станцию.

В табл. 1 приведены сводные результаты точности нивелирования, полученные на участке «Куты» до и после введения поправок за влияние рефракции (δh_r), а в табл. 2 аналогичные данные, полученные на участке «Поляки». Верхняя часть табл. 2 соответствует такому нивелированию, при котором нивелир находился под зонтом, а нижняя часть — в термозащитном кожухе.

Таблица 1

Результаты введения поправок за влияние рефракции в превышения на участке «Куты» (направление «юг-север»)

Дата	Число наблюдений	Оценка точности нивелирования до введения поправок δh_r			Оценка точности нивелирования после введения поправок δh_r			$\Sigma \delta h_r$
		Колебания h за день	мм	мм	Колебания h за день	мм	мм	
15/VIII	10	0,78	0	$\pm 0,24$	0,85	-0,07	$\pm 0,25$	-0,71
16/VIII	14	1,15	-0,21	$\pm 0,26$	1,25	-0,15	$\pm 0,29$	+0,78
17/VIII	15	1,03	+0,04	$\pm 0,29$	0,91	+0,05	$\pm 0,23$	+0,18
18/VIII	15	0,68	-0,01	$\pm 0,18$	0,99	-0,15	$\pm 0,21$	-1,97
20/VIII	13	0,81	-0,06	$\pm 0,21$	0,89	-0,07	$\pm 0,28$	-0,11
21/VIII	15	0,72	+0,05	$\pm 0,24$	1,02	-0,04	$\pm 0,28$	-1,45
22/VIII	14	1,01	+0,01	$\pm 0,23$	1,14	-0,10	$\pm 0,30$	-1,51
23/VIII	15	0,84	+0,20	$\pm 0,21$	0,66	+0,15	$\pm 0,18$	-0,70
8 дней	111 11,1 км	Колебания h в ходе 1,26	Θ хода $\pm 0,005$	m хода $\pm 0,23$	Колебания h в ходе 1,48	Θ хода -0,044	$m_{ср}$ хода $\pm 0,27$	-5,49

Из табл. 1 и 2 видно, что колебания h в течение одного дня нивелирования и средние квадратические погрешности работы на одной станции после введения поправок δh_r на участке «Куты» в 72% случаев увеличиваются, а на участке «Поляки» во всех случаях уменьшаются; систематические части ошибок после введения поправок δh_r в 75% случаев на участке «Куты» и в 25% случаев на участке «Поляки» — увеличиваются. Сравнивая точность работы нивелира под зонтом и в термозащитном кожухе до введения поправок δh_r , легко убедиться, что термозащита нивелира в два-три раза превышает точность нивелирования.

Введение поправок δh_r в превышения, полученные нивелиром в термозащитном кожухе, значительно улучшает результаты нивелирования. Правда, случайные ошибки уменьшаются всего на 20%, но систематические становятся меньше приблизительно в три раза. Анализ табл. 1 и 2 указывает на то, что погрешности от влияния тепловых воздействий и от рефракции находятся в тесном взаимодействии и зависят как от состояния источников, так и от направления хода. Они или компенсируются, или накладываются, увеличивая суммарную погрешность.

Результаты введения поправок за влияние рефракции в превышения на участке «Поляки» (направление «запад-восток»)

Дата	Число определений	Оценка точности нивелирования до введения поправок δh_r			Оценка точности пиверирования после введения поправок		
		колебание h за день	Θ , мм	m , мм	колебание h за день	Θ , мм	m , мм
Нивелир под зонтом							
27/VIII—1963	22	1,11	+0,03	$\pm 0,30$	0,76	+0,10	$\pm 0,21$
28/VIII	22	1,00	+0,22	$\pm 0,24$	0,99	+0,11	$\pm 0,24$
29/VIII	22	1,22	-0,33	$\pm 0,26$	1,13	+0,14	$\pm 0,20$
30/VIII	18	1,30	-0,25	$\pm 0,28$	1,18	-0,07	$\pm 0,26$
4 дня	84	Колебание h в ходе 1,90	Θ хода +0,05	m хода $\pm 0,33$	Колебание h в ходе 1,68	Θ хода +0,02	m хода +0,23

Нивелир в кожухе

27/VIII—1963	22	0,50	-0,05	$\pm 0,15$	0,40	+0,01	$\pm 0,11$
28/VIII	22	0,38	+0,13	$\pm 0,15$	0,40	+0,04	$\pm 0,10$
29/VIII	22	0,64	+0,09	$\pm 0,17$	0,53	+0,02	$\pm 0,14$
30/VIII	18	0,73	-0,12	$\pm 0,22$	0,29	+0,03	$\pm 0,12$
4 дня	84	Колебание h в ходе 1,35	θ хода +0,09	m хода -0,14	Колебание h в ходе 0,35	θ хода +0,03	m хода $\pm 0,13$

Оказывается, при нивелировании ходов в направлении юг-север (или наоборот) наблюдается естественная компенсация погрешностей более чем на 70%, поэтому при введении поправок за влияние рефракции обнажаются погрешности от тепловых воздействий и систематическая часть ошибок увеличивается (табл. 1).

При нивелировании ходов с направлением «запад-восток» погрешности от влияния рефракции и тепловых воздействий компенсируются в очень малой степени (примерно 25%), поэтому введение поправок δh_r в основном улучшает результаты нивелирования. Использование термостатированного нивелира в ходах любого направления дает возможность добиться если не полного, то значительного устранения ошибок тепловых воздействий. В этом случае введение поправок за влияние рефракции окажется действенной мерой повышения точности нивелирования.

Описанная выше методика введения поправок за влияние рефракции была проверена на материалах нивелирования 1966 г., проведенного на Крымском геодинатическом полигоне (рисунок).

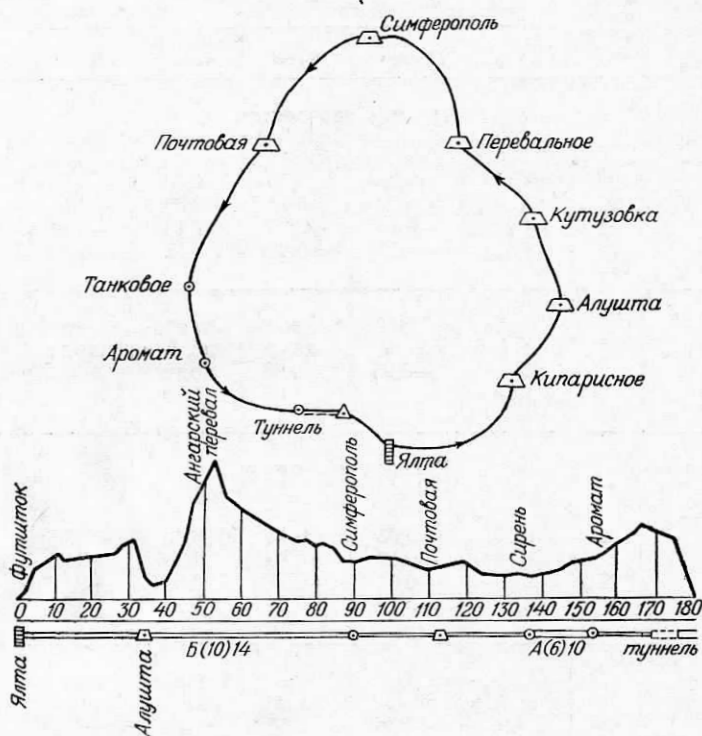


Схема и профиль Крымского геодинатического полигона.

Введение поправок по формуле (3) дало следующие результаты:

Критерии оценки точности	До введения поправок	После введения поправок	После введения поправок в секции с направлением «запад-восток»
Систематическая ошибка на 1 км хода	+ 0,035	+ 0,05	+ 0,018
Случайная средняя квадратическая ошибка на 1 км хода	$\pm 0,32$	$\pm 0,38$	$\pm 0,31$
Невязка в полигоне	+19,5	+21,5	+10,0

Введение поправок δh_r во все секции полигона не улучшило результатов нивелирования, так как полигон имеет форму, близкую к четырехугольнику с почти одинаковыми длинами участков, направленных по меридиану и параллели. Введение

поправок δh_r в секции, направленные по параллели, и в секции, выполненные нивелиром *Koni—007* (с компенсатором), повысило точность нивелирования приблизительно в два раза.

Проведенный анализ выполненных нами экспериментальных работ позволяет сделать следующие выводы:

1. Точность высокоточного нивелирования в основном лимитируется погрешностями от влияния внешней среды.

2. Эффективными мерами ослабления погрешностей от тепловых воздействий могут служить: а) основательная термозащита уровенных нивелиров специальными кожухами (предпочтительней, чтобы термозащита предусматривалась при изготовлении нивелиров); б) применение нивелиров с компенсаторами.

3. Поправки за влияние рефракции имеет смысл вводить только в превышения, полученные термостатированными нивелирами. При этом лучше использовать формулу Куккамяки как наиболее подходящую и удобную для практического применения.

4. Поправки за рефракцию в результаты нивелирования, полученные нетермостатированными нивелирами, можно вводить только в хода, направленные с запада на восток (или с востока на запад). В хода меридианальных направлений вводить поправку за рефракцию не следует, ибо это нарушает естественную компенсацию погрешностей от рефракции и от тепловых воздействий и тем самым увеличивает систематические ошибки нивелирования.

5. Исходными данными для введения поправок за рефракцию могут служить: а) измерения температуры на высотах 0,5 м и 2,5 м от земли на каждой станции или на специально оборудованном пункте, находящемся примерно в середине участка, выполняемого за один день; б) измерения высоты инструмента на каждой станции с точностью до 5 см.

Список литературы: 1. Куккамяки Т. И. Влияние рефракции в нижних слоях на прецизионное нивелирование. Балтийская геодезическая комиссия. Хельсинки, 1936, 1937. Библиотека ЦНИИГАиК, перевод № 1392 и 1394. 2. Куккамяки Т. И. О нивелирной рефракции. — Известия финского геодезического института. Хельсинки, 1938, № 25. Библиотека ЦНИИГАиК, перевод № 1393. 3. Павлов Н. А. Рефракция в высокоточном и точном нивелировании. — Тр. ЦНИИГАиК, 1937, вып. 23. 4. Патова З. Ф. Некоторые усовершенствования в методике высокоточного нивелирования. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1971, вып. 13. 5. Татевян А. Ш. Влияние рефракции в приземном слое воздуха на результаты нивелирования. Автореф. дис. ...канд. техн. наук. М., 1955. 6. Энтин И. Н. Высокоточное нивелирование. — Тр. ЦНИИГАиК, 1956, вып. 111.

Работа поступила 14 марта 1978 года. Рекомендована кафедрой геодезии Львовского политехнического института.