



ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

№ 78-10000

ИТЭФ- 125

Н.И. ПОРУБАЯ

ОПЫТ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ
РАССТОЯНИЙ ИНВАРНОЙ ПРОВОЛОКОЙ
НА УСКОРИТЕЛЯХ

1977

МОСКВА 1977

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

ФФ - 125

Н.И. Порушев

ОПЫТ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ
ИНВАРНОЙ ПРОВОЛОКОЙ НА УСКОРИТЕЛЯХ

Москва

1977

Описывается методика точного измерения расстояний инварной проволокой с анализом погрешностей измерений. Оценка нестабильности рабочих проволок, проволок-эталонов, а также инварных лент во времени. Исследовано удлинение инварных проволок длиной 6, 19, 25 и 38 м в зависимости от времени применения непрерывного натяжения. Приведены данные об изменении термических коэффициентов α и β во времени для инварных проволок и лент. Сообщаются результаты многолетних измерений плановых деформаций кольцевого фундамента ускорителя ИТЭФ, а также дается краткая информация об измерении расстояний с помощью дистинвара и уровня дилатомата.

Общие сведения

При строительстве, монтаже и эксплуатации ускорителей частиц наиболее надежным и точным методом измерения планового положения опорных пунктов, магнитов, конструкций,* их поведения во времени, являются линейные измерения с помощью инварных проволок и лент.

В ИТЭФ, начиная с 1969 г., почти непрерывно ведутся измерения расстояний инварными проволоками и лентами, при определении смещений и деформаций кольцевого фундамента, для установки блоков электромагнита в расчетное положение [1], [2], [3] и последующих корректировок блоков, для создания опорной микротрилатерационной сети при сооружении 6-мстрового спектрометра [4] и др.

* Под конструкциями ускорителя, требующими точных измерений, будем понимать опорные знаки геодезической сети, мостовые балки, опирающиеся на фундаменты, несущие пакеты магнитов в кольцевых ускорителях или трубах дрейфа в линейных ускорителях, механизмы их регулировки, экспериментальные установки каналов транспортировки пучков и др.

В настоящей статье сообщается о накопленном в ИТЭФ опыте высокоточных измерений расстояний суперинварными проволоками и лентами. По-видимому, и сегодня несмотря на быстрое развитие светодальномерных методов измерений расстояний и повсеместного внедрения их в практику геодезических работ, измерения инварными проволоками и лентами расстояний до 50 метров со средней квадратичной погрешностью < 40 мкм, остаются наиболее надежными и точными. За рубежом при сооружении ускорителей частиц также широко используют инварные проволоки и ленты при построении плановых опорных геодезических сетей, при установках магнитов в проектное положение [5], [6], [7], [8], [9].

Методика линейных измерений и аппаратура

Измерения мерными проволоками и лентами выполнялись по методике МИИГЛАН, разработанной для установки магнитов протонного синхротрона на 7 ГэВ, обеспечивающей получение результатов измерений расстояний до 40 метров со средней квадратичной погрешностью около 40 мкм [10].

К основным особенностям этой методики следует отнести:

1. Измерение расстояний суперинварными проволоками с применением отсчетных микроскопов;
2. Наличие на месте измерений рабочего компаратора (ПК) стационарного типа (вместо нормального жезла применяются проволоки-эталоны) для эталонирования мерных проводов;

3. Метод измерений подобен применяемому при компарировании проволок на стационарном компараторе;

4. Длины мерных проволок равны длине измеряемых линий; измерения любой длины до 40 м выполняются двумя мерными проволоками или лентами;

5. Применение новой по конструкции измерительной аппаратуры.

Однако следует отметить, что в процессе проведения самих измерений на фундаменте электромагнита ускорителя ИТЭФ некоторые положения разработанной методики были уточнены и развиты с учетом опыта измерений. Примером может служить следующее:

а) применение одностороннего натяжения позволило повысить точность измерений. При этом уменьшается погрешность вследствие неодновременности отсчетов по шкалам проволоки, сходимость в разности отсчетов была лучше. Стабильное положение проволоки во время отсчитывания сокращает время отсчетов, повышается производительность труда;

б) из-за растяжения (что особенно заметно для 38,0 - метровых проволок при натяжении 15кГ) в условиях измерения расстояний, где проволока периодически находится под натяжением в течение ≈ 5 мин., затем расслабляется на 5+10 мин, после чего снова растягивается и т.д.; при этом длины, измеряемые в каждом отдельном периоде, разнятся на несколько микрон друг от друга и от величин, получаемых при

сравнения в зависимости от продолжительности последующих периодов натяжения и расслабления. С удлинением инварной проволоки в зависимости от времени непрерывного натяжения мы неожиданно встретились при первых же измерениях 38-метровыми проволоками радиальных сторон опорной сети ускорителя ИТЭФ (октябрь 1959 г.). Наше внимание было обращено на это явление из-за недопустимых колебаний разностей уровней двух проволок, участвовавших в измерениях длины редуса. В то время мы не знали, что с этим явлением встречается механика ЦЕФИ при измерениях инварной проволокой 100-метровой длины /5/. /8/. Как показала практика, для обеспечения точности $> 10^{-5}$ следует отсчитывать быстро, соблюдая одинаковые интервалы времени при отсчитывании, как во время измерений, так и во время эталонирования. Такая методика существенно уменьшает погрешность из-за растяжения инварной меры. Следует подчеркнуть, что упомянутая погрешность зависит от длины меры, времени и силы натяжения;

в) определено отличие температуры инварной проволоки от температуры воздуха для лабораторного помещения. Измерение произведено методом контакта с помощью термометра сопротивления БЭП-230 и электронного моста ЭМУА-35. Максимальное отличие температуры проволоки от температуры воздуха в закрытом помещении было в среднем порядка $0,5^{\circ}\text{C}$;

г) сконструированы, изготовлены и испытаны ювные стек-

длинные шкалы и оправы к ним, способ крепления к оправам проволоки и лент; созданы беситативные блочные устройства.

Мерные проволоки длиной 6,02м; 8,42; 8,59; 9,45; 9,64; 16,91; 19; 25,02 и 38,0 м изготавливались в мастерских ИТЭФ из суперинварной проволоки марки *N* ЗИК5 (диаметр 1,70 мм), предварительно подвергнутой специальной механической и термической обработке с целью придания ей стабильности, а также для уменьшения термических коэффициентов до величины $< 10^{-6}$. На длину в один метр на 1°C суперинвар имеет следующие термические коэффициенты:

$\alpha = +0,352$ мкм, $\beta = +0,0045$ мкм, α и β соответственно линейный и квадратичный коэффициенты расширения.

Последние определены по двум образцам 24-метровой проволоки одной плавки *N* ЗИК5 и обработки. Для инварных лент поперечного сечения $6,0 \times 0,6$ мм² термические коэффициенты равны: $\alpha = +0,076$ мкм, $\beta = +0,0069$ мкм. Мерные проволоки снабжены стеклянными шкалами в оправе из инвара (рис.1), приспособленными для отсчитывания по микроскопам. Шкала изготовлена из оптического стекла БК-10 (установлена в оправе так, чтобы продольный штрих шкалы совпал с осью проволоки), является плоско-параллельной пластинкой размера $50 \times 10 \times 5$ мм³ с миллиметровыми делениями, оцифрованными через 5 мм. Погрешности делений шкал определены на УИМ-21 и достигают величины $< \pm 5$ мкм. При измерениях штрихи шкал (толщиной 20 мкм) располагаются в $0,2 \pm 0,3$ мм от перекрестий шариковых центров. Это позволяет одновремен-

но наблюдать с микроскоп, не изменяя фокусировки, как центр фундаментального знака опорной сети ($\Phi 3$) так и штрихи шкалы, не внося в отсчеты заметных погрешностей из-за наклона шкалы и влияния параллакса. Отсчеты по шкалам брались с помощью отсчетных микроскопов конструкции МИГАиК (рис.2) с увеличением $25\times$ и ценой деления барабана микрометра 5 мкм. Поле зрения микроскопа 5 мм, диапазон перемещения верхней части микроскопа (центрировка) 6 мм. Средняя квадратичная погрешность отсчета этих микроскопом по стеклянным шкалам не превышает 5 мкм. Перед измерениями каждый микроскоп исследовался, определялась цена деления барабана микрометра при помощи эталонной стеклянной шкалы. Размеры сторон опорной сети позволили измерять их путем однократного уложения мерной проволоки, что способствовало повышению точности измерений. Длины проволок равнялись длинам сторон трилатеральной сети. Каждая сторона измерялась двумя проволоками при трех свивтах. Натяжение проволок длиной 38,0 м осуществлялось калиброванными грузами 15 кг, проволок меньшей длины - грузами 10 кг. Стабильность натяжения обеспечивалась не только равным весом грузов, но и подбором блоков от базисного прибора БП-2 с помощью разновесов, "чувствующих" изменение в нагрузке 5-7 г не вносящее погрешностей более 10 мкм. 15 мкм в результате измерений для длины 38,0 м. Для подвеса проволок использовали стандартные карабины со струной ϕ 0,6 мм из нержавеющей стали. При измерениях и эталонировании применяли одни и те же грузы, блоки, карабины, струнки. Измерение длины радиуса или (хорды) одной инварной проволокой выполняется в следующем порядке:

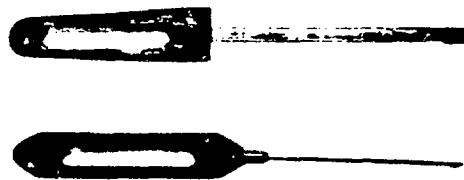


Рис.1. Стеклянная шпала в оправе из пинцера

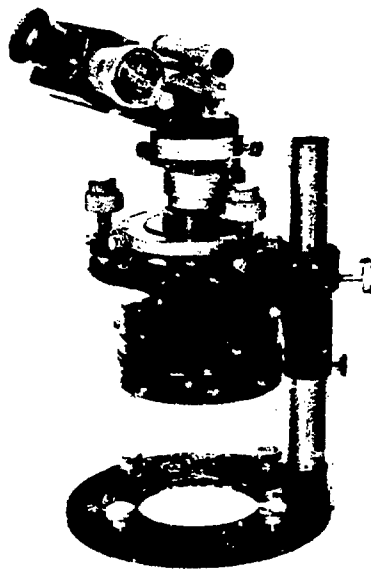


Рис.2. Отсчетный микроскоп конструкции МИРГАМ

1) Отсчитывание температуры воздуха по ртутным термометрам с точностью $0,1^{\circ}\text{C}$ (применяли лабораторные термометры ТЛ-4 с пределами градуировки от 0° до 50°C и попокой деления $0,1^{\circ}\text{C}$) в трех точках на высоте подвеса проволоки и вблизи ее, на центральном опорном знаке (ЦОЗ) - t_1 , середине круглого зала - t_2 , в магнитном зале около ФЗ - t_3 (см. рис.3).

2) Одновременное отсчитывание с помощью микроскопа на штрихи передней и задней шкал проволоки - a_2 и a_3 , независимо при трех положениях проволоки. наблюдатели снабжены телефонно-микрофонной гарнитурой ТМГ-1, питание обеспечивалось четырьмя сухими элементами 165-У, длина проводов 50м.

3) Троекратное отсчитывание с помощью микроскопа на перекрестия шариковых центров - v_1 и v_2 .

Контроль измерений длин радиуса (хорды) одной проволокой производят по колебаниям разностей отсчетов на штрихи шкал ($a_2 - a_3$), колебание которых допускалось не более 5 делений барабана микрометра (≈ 25 мкм). Контроль измерения радиуса (хорды) по двум проволокам производят по равенности уравнений двух проволок, выраженных в делениях барабана микрометра. Величина допустимого расхождения не более 10 делений (≈ 50 мкм) установлена эмпирически по результатам первых циклов измерений. Для измерения всех 28 радиусов двумя проволоками требуется два рабочих дня бригаде, состоящей из пяти человек (три ИТР + два лаборанта 4 разряда). Приведем некоторые методические предосторожности, применявшиеся нами во время измерений.

1. Особую осторожность и внимание следует проявить при транспортировке (перетяжке) проволоки из магнитного железа на ЦОЗ. При измерении радиусов проволоку не берем руками, как обычно принято, а перетягивали с помощью двух барабанов $\varnothing 0,6$ м и пристяжного тросика. При перетяжке проволока раскачивается в вертикальной плоскости, значительно сотрясается, может изменить свою длину /II/, стр.226. Поэтому проволоку, чтобы уменьшить сотрясение, следует поддерживать деревянной вешкой с мягким войлочным концом, особо предохраняя ее при протаскивании через геодезические проемы в защитной стене. При таких условиях работы совершенно необходимо эталонировать проволоки до и после измерений.

2. Следует проявить внимание при подвеске грузов, визуально уточнить, находится ли плоскость блока в створе проволоки, т.е. убедиться, нет ли перекоса блоков.

3. При отсчитывании по шкалам надо следить, чтобы шкала проволоки только слегка касалась шарикового центра и не касалась подставки (штанги) микроскопа или корпуса его осветителя. Продольный штрих шкалы при отсчитывании должен проходить через перекрестие шарикового центра.

4. При измерениях, как и при компарировании, отсчитывать по проволокам надо быстро, соблюдая равные промежутки времени, когда проволока находится под натяжением грузов, уменьшая таким образом погрешность из-за растяжения (см.стр.6).

Длине радиуса (хорды) вычисляется по формуле

$$D = l_{\text{ср}} + (a_2 - a_1) - (b_2 - b_1) + \Delta t, \quad (I)$$

где l_{cp} - средняя длина рабочей проволоки, полученная из результатов компарирования до и после измерений;

$(a_n - a_s)$ - разность отсчетов по шкалам проволоки (среднее из трех измерений);

$(b_n - b_s)$ - разность отсчетов на центры знаков (среднее из трех измерений);

$\Delta z'$ - поправка на температуру.

Записи величин в журнале разработанной в ИТЭФ формы, а окончательные вычисления расстояний на специальных бланках.

Измерения радиусов и хорд (рис. 3) для определения положения ФЗ производили циклами. Любой цикл линейных измерений включает в себя следующие работы:

1) компарирование проволок-эталонов на стационарном компараторе МИИГАиК;

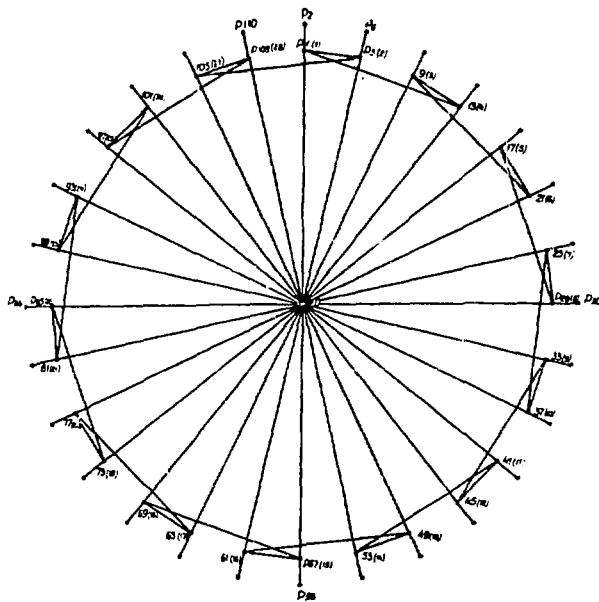
2) компарирование мерных проволок ($l_1 = 38,0$ м и $l_2 = 25,02$ м) на РК ИТЭФ до измерений на кольце;

3) измерение радиусов и хорд на кольце;

4) повторное компарирование мерных проволок на РК после измерений.

Эталонирование суперинварных проволок на РК ИТЭФ

Все мерные приборы (проволоки, ленты) длиной до 24,0 м эталонировали на компараторе МИИГАиК. Компаратор, предназначенный до этого для эталонирования линейных мер, кратных 1 метру, был по заказу ИТЭФ переоборудован, что позволило эталонировать мерные проволоки любой длины от 0,1 до 24,0 м. Средняя квадратичная погрешность эталонирования на переоборудованном компараторе < 12 мкм /12/.



0 - центральный репер (знак)
 1,5 - 109 реперы (опорные знаки)
 В скобках указаны порядковые номера реперов

Схема измеренных линий геодезической сети

Рис 3

Для эталонирования мерных инварных проволок длиной более 24,0 м (25,02 м; 38,0 м; 42,64 м) в здании ускорителя был построен РК рис.4. Микроскопы этого компаратора с ценой деления 1 мкм и увеличением $40\times$ укреплены на массивных железобетонных столбах, установленных один от другого на расстояниях, соответствующих длинам эталонов и рабочих мерных проволок. Фундаменты столбов заглублены на уровень фундамента здания и развязаны от него. Специальные исследования показали практически полную устойчивость микроскопов в течение суток, (суточный ход 38-метровой базы компаратора < 10 мкм), а время, необходимое на выполнение одного приема эталонирования двух проволок, составляет 1,5-2 ч. Каждый прием эталонирования проволок включает два определения длины компаратора в начале и в конце приема.

Приведение микроскопов компаратора в рабочее положение осуществлялось методами астировки компаратора МИИГАиК /11/ стр.298. Для определения длины РК (расстояние между осями крайних микроскоп-микрометров) служили проволока-эталон, длину которых определяли на переоборудованном компараторе МИИГАиК. Так, например, расстояние между микроскопами, отстоящими друг от друга на 38,0 м, получали как сумму двух расстояний по 19,0 м. Измерение производили проволоками-эталоном длиной 19,0 м. Длину компаратора в 25,02 м измеряли проволоками-эталоном 19,0 м и 6,02 м. При эталонировании проволок одним приемом операции производились в следующем порядке:

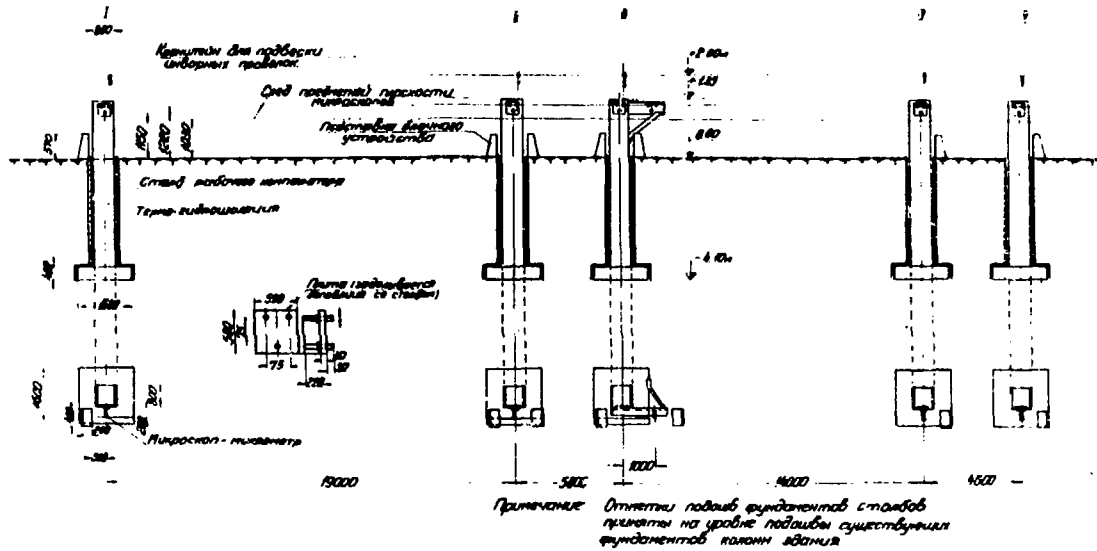


Рис. 4 Схематический чертеж рабочего компаратора УТЗФ

1) измерение температуры воздуха по трем ртутным термометрам, расположенным равномерно вдоль компаратора на высоте повеса проволоки и вблизи ее, с точностью до $0,1^{\circ}\text{C}$;

2) измерение длины компаратора двумя проволоками-эталоном ходом "прямо" и ходом "обратно" с переменной мест наблюдателей; штрихи проволок в прямом ходе отсчитываются в порядке 20,30,40, а в обратном ходе 40,30,20. На каждый штрих производится три наведения биссекторов микроскопа и берутся три пары одновременных отсчетов целых делений барабана микрометра;

3) измерение температуры воздуха, аналогично пунту 1;

4) сравнения длин рабочих проволок с длиной компаратора ходом "прямо" и ходом "обратно" с переменной мест наблюдателей в таком же порядке, как в пункте 2;

5) измерение температуры воздуха;

6) измерение длины компаратора (так же, как в пункте 2);

7) вновь измеряется температура воздуха.

Контроль при эталонировании заключается в следующем:

а) расхождение разностей каждого штриха по двум микроскопам < 15 делений барабана микрометра ($\approx 15\text{мкм}$), то же по различным штрихам в одном полуприве < 40 делений барабана микрометра ($\approx 40\text{мкм}$);

б) расхождение средних значений разностей по двум микроскопам для одноименных штрихов между прямым и обратным ходом < 40 делений;

в) расхождение длин компараторов, полученных из прямого и обратного ходов < 20 делений;

г) расхождение длин рабочих проволок, полученных из двоянных приемов, < 20 делений;

д) расхождение результатов измерений длины компаратора до и после определений длин рабочих проволок < 30 делений. Установлено на основании опытных данных измерений на компараторе ИТЭФ.

Цены делений барабанов микроскоп-микрометров определялись каждый раз перед эталонированием проволоки, а также после каждой корректировки микроскопов. Эталонирование проволок всегда выполнялось с учетом методических рекомендаций работы /II/ стр.298, например, для уменьшения погрешности из-за трения блоков при переходе от одной пары отсчетов к другой плавно перемещали проволоку в противоположных направлениях; для ослабления систематических погрешностей наведений на штрихи шкал (личные погрешности) наблюдатели менялись местами и др. Обработка результатов эталонирования выполнялась по методическим рекомендациям, данным в работе /I3/. Длина компаратора ($L_{CF} = 38,0$ м и $L_{AS} = 25,02$ м) приводилась к температуре $+20^{\circ}\text{C}$ с помощью таблиц, составленных на каждую длину.

Для этого сначала длины проволок-эталонов приводились от температуры эталонирования в компараторе МИИГАиК к температуре $+20^{\circ}\text{C}$ по формуле:

$$\Delta L = \alpha(20 - t_k) + \beta(400 - t_k^2), \quad (2)$$

где α и β - температурные коэффициенты на всю длину проволоки на 1°C , t_k - температура эталонирования проволоки в МИИГАиК, а затем от температуры $t = +20^{\circ}\text{C}$ к температуре измерения длины компаратора ИТЭФ по формуле:

$$\Delta t = \alpha(t_{исм} - 20^\circ) + \beta(t_{исм}^2 - 400), \quad (3)$$

где $t_{исм}$ - температура проволоки при измерении последней длины компаратора ИТЭФ. Аналогично вводились поправки Δt в длины рабочих проволок ($l_1 = 38,0\text{м}$ и $l_2 = 25,02\text{м}$) для приведения длины проволоки от температуры компарирования в ИТЭФ к температуре $t = +20^\circ\text{С}$.

Таким образом, уравнения рабочих проволок были приведены к температуре $+20^\circ\text{С}$ в соответствии с /13/ стр.24.

Расчет точности эталонирования проволок
на РК ИТЭФ

Рассчитаем ожидаемую погрешность эталонирования мерных проволок на РК ИТЭФ. Погрешность эталонирования мерных приборов на компараторе /II/ стр.298 складывается из погрешности определения длины компаратора m_k и погрешности сравнения мерного прибора с компаратором $m_{ср}$.

Очевидно, погрешность измерения длины рабочей проволоки $m_{пр}$ можно представить в виде

$$m_{пр} = \sqrt{m_k^2 + m_{ср}^2}. \quad (4)$$

Как отмечено выше, в наших условиях длина компаратора измеряется проволоками-эталоном, поэтому погрешность m_k складывается из погрешности из-за неточного знания длины проволоки-эталоны $m_{эт}$ и погрешности сравнения длины проволоки-эталоны с длиной компаратора $m'_{ср}$, т.е.

$$m_k = \sqrt{m_{эт}^2 + m'_{ср}^2}. \quad (5)$$

По опыту эталонирования проволок длиной 24 м в существующем компараторе МИГЛжК средняя квадратичная погрешность эталонирования проволоки 24 м < 12 мкм /12/. Для расчета с некоторым приближением, при условии постоянства длины проволок-эталонов или незначительных их изменений примем $m_{ст} = \pm 12$ мкм. Но так как проволоки-эталонны при измерении длины компаратора ИТЭФ участвуют в двух пролетах, то, очевидно, величину $m_{ст}$ надо удвоить, так как последняя обладает свойством постоянной погрешности, т.е. $m_{ст} = \pm 24$ мкм. При этом величина $m_{ст}$ не зависит от числа приемов измерения длины компаратора. Измерение длины компаратора ИТЭФ проволоками-эталонами выполняется точно так же, как и сравнение длины проволок с компаратором при эталонировании их в компараторе МИГЛжК. Поэтому погрешность переноса длин проволок-эталонов на длину компаратора ИТЭФ будет равна погрешности сравнения длин проволок с длиной компаратора МИГЛжК. Из исследований А.В.Кондрашкова /14/ эта погрешность для одного приема сравнения проволок длиной 24 м равна ± 10 мкм. Так как в длине компаратора ИТЭФ проволоки-эталонны участвуют в двух пролетах, то погрешность сравнения длины проволок-эталонов с длиной РК одним приемом будет $m'_{ср} = 10 \sqrt{2} = \pm 14$ мкм, а два сравнения длин проволок-эталонов с длиной компаратора, выполняемые в начале и конце приема эталонирования рабочих проволок, внесут погрешность в среднюю длину компаратора $14/\sqrt{2}$, равную ± 10 мкм, т.е. $m'_{ср} = \pm 10$ мкм. Следовательно, погрешность длины компаратора ИТЭФ, соответствующая одному приему измерения проволок, согласно (5) равна

$$m_k = \sqrt{(24)^2 + (10)^2} = \pm 26 \text{ мкм}$$

Сравнение длин рабочих проволок с длиной компаратора ИТЭФ выполняется так же, как и на компараторе МИГТЛК. Однако рабочие проволоки ИТЭФ длиной 38 м натягиваются грузами весом 15 кгс, т.е. в 1,5 раза больше обычного. Поэтому погрешность сравнения длин рабочих проволок, с длиной компаратора, вызванную погрешностями натяжения и другими погрешностями, например из-за растяжения, положим в полтора раза больше, чем при обычном натяжении. В этом случае для наших условий для одного приема положим $m_{пр} = \pm 15$ мкм. Таким образом, ожидаемая погрешность измерения длины рабочей проволоки длиной 38,0 м на компараторе ИТЭФ одним приемом согласно (4) равна:

$$m_{пр} = \sqrt{(26)^2 + (15)^2} = \pm 30 \text{ мкм}$$

$$\text{Для двух приемов будем иметь } m_{пр} = \sqrt{(26)^2 + \left(\frac{15}{2}\right)^2} = \pm 28 \text{ мкм}$$

Оценка точности по материалам эталонирования проволок

На РК ИТЭФ мерные проволоки длиной 38,0 м и 25,02 м эталонировали двумя приемами дважды до и после измерения сторон опорной сети.

В таблице I представлены разности d_i мкм длин РК ИТЭФ (полная длина состоит из двух пролетов), каждая из которых измерена двумя проволоками-эталоном дважды в прямом и обратном направлениях. По этим разностям (см. обе выборки объемом из 60 и 22 измерений), содержащим малую систематическую погрешность δ_i , получена средняя квадратичная погрешность m_k измерения длины компаратора ИТЭФ двумя проволоками-эталоном одним приемом.

Таблица 1
 Определение погрешности измерения длины
 рабочего компаратора ИТЭФ

№ п/п	Дата измерения	d	d'
		мм	мм
1	10.10.80	+3.1	+3.9
2	10.10	+3.1	+3.7
3	20.11	-8.1	-6.6
4	22.11	-13.4	-14.0
5	20.11	+3.4	+2.0
6	23.12	-7.6	-9.0
7	26.12	+8.7	+4.3
8	3.01.81	-3.8	-5.3
9	6.01	+1.8	-3.2
10	1.02	+30.7	+29.3
11	4.02	+1.7	+0.3
12	6.02	-23.3	-26.9
13	13.02	+6.4	+5.0
14	5.03	+0.4	+3.3
15	9.03	+8.7	+7.3
16	30.03	+4.8	+6.3
17	8.04	+11.0	+9.8
18	9.06	+5.6	+4.2
19	21.06	+0.7	+2.1
20	9.08	+12.3	+3.7
21	20.08	-26.8	-28.2
22	27.08	+1.6	+0.2
23	13.11	+9.0	+7.8
24	18.11	-1.1	-2.8
25	19.11	+8.4	+4.0
26	21.11	+9.8	+4.6
27	26.11	+23.3	+24.9
28	20.01.81	+16.7	+15.0
29	23.01	+4.7	+3.3
30	14.02	-4.4	-3.8

№ п/п	Дата измерения	d	d'
		мм	мм
31	20.04.81	+0.4	-1.0
32	21.04	+7.4	-3.8
33	27.04	+2.4	+1.0
34	28.04	+9.3	+6.1
35	8.07	+3.8	+2.4
36	10.07	-0.3	-1.7
37	11.07	+14.8	+13.4
38	20.07	+18.4	+17.0
39	4.01.82	-34.3	-32.7
40	6.01	-16.6	-18.0
41	20.01	+5.4	+4.0
42	4.04	-7.1	-8.5
43	9.04	+0.4	-0.8
44	11.04	+8.3	+4.9
45	26.07	-5.0	-6.4
46	3.08	+1.8	+0.4
47	29.12	-3.8	-2.2
48	9.01.83	-5.7	-7.1
49	21.08	+4.1	+2.7
50	23.08	+6.9	+5.5
51	27.08	-6.1	-4.5
52	28.08	+0.1	-1.3
53	29.09	+1.5	+0.1
54	20.12	+5.3	+3.9
55	6.03.84	-12.2	-13.8
56	13.03	+0.4	-1.0
57	10.10	+16.8	+7.4
58	5.03.85	+14.2	+16.6
59	17.03	+3.4	+4.0
60	30.03	+9.8	+8.4

№ п/п	Дата измерения	d	d'
		мм	мм
1	4.04.81	+8.3	+9.4
2	8.04	+7.7	+6.3
3	11.06	+22.2	+21.0
4	18.11	+30.8	+34.4
5	22.11	+4.8	+5.8
6	24.11	+3.1	+4.2
7	20.01.81	+12.8	+14.0
8	21.04	+24.3	+23.3
9	22.04	+4.2	+5.4
10	23.04	-13.9	+2.7
11	23.04	-19.2	-18.0
12	13.01.82	+3.6	+4.8
13	15.01	+4.4	+6.0
14	29.03	+0.2	+1.0
15	9.04	-17.8	-16.7
16	27.07	+25.9	+24.7
17	2.08	-0.3	-0.7
18	31.1	+18.4	+19.6
19	5.08.83	+20.3	+19.1
20	12.12	+21.8	+23.4
21	18.09	+12.4	+13.6
22	24.12	+0.0	+12.9

$$[d] = -26 \quad \sigma_{[d]} = -1.2$$

$$[d^2] = 9659 \quad m_{d^2} = \sqrt{\frac{[d^2]}{n-1}} = 16,4 \text{ мм}$$

$$m_d = 21,6 \text{ мм}$$

$$[d] = +84 \quad \sigma_{[d]} = 1,4$$

$$[d^2] = 11372 \quad m_{d^2} = \sqrt{\frac{[d^2]}{58}} = 13,9 \text{ мм}$$

$$m_d = 2,9 \text{ мм}$$

Определение погрешности сравнения длины мерной
прямой с длиной рабочего компаратора.

Таблица 2

Лист 1

№ п/п	Дата измерения	Погрешности Δ в мкм					
		1	2	3	4	5	6
1	10 10 30	+1	-2	0	-2	-	-
2	10 10	+2	+3	-7	-6	-	-
3	20 11	+1	-1	-6	-4	-	-
4	22 11	+2	+2	+3	+3	-	-
5	20 11	+1	-2	+4	-1	-	-
6	25 12	+4	+1	+6	-4	-	-
7	20 12	+4	+2	+1	-7	-	-
8	3 01 60	+5	-7	+3	+5	-	-
9	3 01	+3	-1	+1	-4	-	-
10	1 02	+3	+6	+3	+3	-	-
11	4 02	+3	+1	+1	-9	-	-
12	0 02	-2	+1	+3	+3	-	-
13	13 02	-	-6	+6	+7	+7	-
14	3 03	-	-4	+1	+1	+8	-
16	8 03	-	-2	-3	+7	+3	-
16	30 03	+10	+8	+7	+8	+16	-6
17	8 04	-2	-7	+7	+7	-	-
18	9 05	+28	+35	+16	+6	-	-
19	21 05	+14	+2	+8	+3	-	-
20	6 06	-	-16	-6	+4	+4	-
21	26 08	-	+14	+28	+6	+13	-
22	27 08	-	-7	+3	+8	+8	-
23	10 10	+1	+1	+7	+7	+3	-13
24	18 11	+6	-1	+9	+8	-4	+8
25	19 11	-3	-1	+3	+3	+8	+7
26	21 11	+3	+2	-1	+3	+3	-7
27	26 11	+2	+1	-3	+6	+3	-
28	20 01 61	+6	+5	+7	+7	+2	-3
29	23 01	-	+1	+7	+8	+3	-
30	14 03	-	-7	+2	+1	+1	-1

(1-2)

$[d] = +69$

$\Theta = \pm \frac{60}{2} = \pm 30$

$[d'] = 1314$

$m_d = \sqrt{\frac{1314}{22}} = \pm 5,5 \text{ мкм}$

$m_{\text{ср}} = \pm 5,9 \text{ мкм}$

(3-4)

$[d] = +122$

$\Theta = \pm \frac{122}{2} = \pm 61$

$[d'] = 2421$

$m_d = \sqrt{\frac{2421}{39}} = \pm 6,4 \text{ мкм}$

$m_{\text{ср}} = \pm 4,5 \text{ мкм}$

(71-72)

$[d] = +214$

$\Theta = \pm \frac{214}{2} = \pm 107$

$[d'] = 1276$

$m_d = \sqrt{\frac{1276}{41}} = \pm 5,5 \text{ мкм}$

$m_{\text{ср}} = \pm 5,9 \text{ мкм}$

Лист 2

№ п/п	Дата измерения	Погрешности Δ в мкм					
		1	2	3	4	5	6
31	20 02 61	-	-	+7	+5	-3	+8
32	24 04	-	-	+7	+7	+2	+8
33	27 04	-	-	+7	+7	+2	+8
34	28 04	-	-	+6	+9	+3	+8
35	8 07	-	-	+2	+8	-3	+3
36	20 07	+9	+4	+7	+3	+7	+3
37	11 07	+2	-3	+1	+1	+8	+3
38	20 07	-2	-1	+1	+1	+7	+3
39	2 01 62	+4	-1	+3	+3	+7	+3
40	6 01	+5	-3	-3	+3	+3	+3
41	20 01	+9	+2	-1	-3	-	-
42	2 04	+3	+2	+7	+7	-	-
43	9 06	-	-	+8	+2	+3	+3
44	11 06	-	-	+2	+9	+3	+3
45	20 07	+7	+2	+5	+5	+6	+6
46	3 08	+2	+5	+4	-1	+9	+9
47	28 12	-7	-2	+1	+1	+1	+6
48	9 01 63	+3	+1	+3	+8	+7	+2
49	21 08	+3	+2	+2	+2	-3	+8
50	23 08	+1	+2	+1	-1	+1	+6
51	27 08	+2	+7	+8	-7	+1	+1
52	28 08	+2	+6	+7	-2	+3	+6
53	26 09	+6	+1	+4	-2	+6	+7
54	20 12	+2	+1	+3	+3	+2	+2
55	6 03 65	+8	-2	+3	+3	+3	+3
56	13 05	+2	+5	+1	+1	+3	+3
57	10 10	+2	+1	+1	+1	+1	+1
58	3 03 63	-7	-2	+2	+2	+1	+1
59	17 03	+3	+2	-2	-2	+3	+7
60	30 06	+3	+8	-7	-2	+1	+1

№ п/п	Дата измерения	Погрешности Δ в мкм					
		1	2	3	4	5	6
1	4 02 60	+4	+4	+4	+6	-	-
2	3 04	+1	+1	+2	+3	-	-
3	11 06	+4	+7	+8	+8	-	-
4	18 11	+3	+7	+3	+6	-	-
5	22 11	+3	+1	+3	+6	-	-
6	15 11	+2	+2	+9	+8	-	-
7	20 01 61	+5	+2	+2	+4	-	-
8	21 04	+1	+5	+8	+1	-	-
9	12 04	+0	-3	-1	-3	-	-
10	10 04	+1	+7	+3	+2	-	-
11	28 04	+8	+1	+3	+6	-	-
12	13 11 62	+2	+1	+3	+3	-	-
13	15 01	+2	+1	+6	+8	-	-
14	24 11	+2	+1	+6	+9	-	-
15	16 11	+6	+4	+4	+8	-	-
16	12 01	+3	+7	+3	+5	-	-
17	2 08	+5	+2	+3	+2	-	-
18	21 03	+2	+8	+4	+3	-	-
19	15 09 63	+1	+1	+2	+1	-	-
20	12 11	+1	+7	+7	+2	-	-
21	16 11	+6	+2	+2	+1	-	-
22	20 12	+3	+2	+3	+6	-	-

(49-50)

$[d] = -75$

$\Theta = \pm \frac{75}{2} = \pm 37,5$

$[d'] = 929$

$m_d = \sqrt{\frac{929}{21}} = \pm 6,6 \text{ мкм}$

$m_{\text{ср}} = \pm 4,7 \text{ мкм}$

(31-32)

$[d] = +43$

$\Theta = \pm \frac{43}{2} = \pm 21,5$

$[d'] = 782$

$m_d = \sqrt{\frac{782}{21}} = \pm 6,1 \text{ мкм}$

$m_{\text{ср}} = \pm 4,5 \text{ мкм}$

эталонирования:

$$m_k = \pm 9,8 \text{ мкм} + \pm 11,6 \text{ мкм} \text{ (среднее } \pm 10,7 \text{ мкм)}.$$

В таблице 2 даны разности d_i мкм для компаратора, каждая из которых измерена эталонируемыми рабочими проволоками (1-2), (3-4), (71-72), (49-50) и (51-52) в прямом и обратном направлениях. Средняя квадратичная погрешность сравнения $m_{ср}$ длины рабочей проволоки с длиной компаратора в одном приеме эталонирования равна $m_{ср} = \pm 3,9 \text{ мкм} + 4,7 \text{ мкм}$ (среднее $\pm 4,3 \text{ мкм}$) для разных проволок. Вычислим теперь

случайную погрешность эталонирования рабочей проволоки $m'_{сл.}$. Она будет равна по (4) $m'_{сл.} = \sqrt{(10,7)^2 + (4,3)^2} = \pm 11,5 \text{ мкм}$.

Полученная погрешность является результатом совместного действия только случайных погрешностей эталонирования.

Для полной характеристики точности эталонирования и

$m_{сл.}$ случ. следует прибавить ожидаемую погрешность из-за неточного знания длин проволок-эталонов, т.е. реальная погрешность эталонирования мерной проволоки на РК ИТЭФ

будет по (5)

$$m_{пр} = \sqrt{(24)^2 + (11,5)^2} = \pm 26,6 \text{ мкм} \text{ и вполне согласуется с предвычисленной ожидаемой погрешностью } m_{пр} = \pm 28 \text{ мкм}.$$

Очевидно, главная ее часть ($m_{пр} = 24 \text{ мкм}$) определяется погрешностями длин проволок-эталонов.

Соображения о погрешностях измерений расстояний
подвесными инварными мерами. Оценка стабильности мер

Среди основных источников погрешностей, влияющих на точность измерения расстояний подвесными мерными приборами (инварными проволоками или лентами), в производственных и лабораторных помещениях можно назвать следующие:

- 1) погрешность собственно измерения - m_1 ;
- 2) погрешность из-за неточного знания длины мерного прибора при его эталонировании - m_2 ;
- 3) погрешность из-за неточного знания термических коэффициентов и температуры мерного прибора - m_3 ;
- 4) погрешность натяжения мерного прибора - m_4 ;
- 5) погрешность от растяжения мерного прибора - m_5 ;
- 6) погрешность от нестабильности длины мерного прибора во времени - m_6 ;
- 7) погрешность из-за наклона мерного прибора - m_7 .

Попытаемся оценить величины перечисленных погрешностей.

I. Погрешность m_1 складывается из погрешностей отсчитывания по шкалам - m_0 , погрешностей делений шкал - m_0 и погрешностей из-за наклона шкал - m_1 . Для наших условий (когда отсчеты производят с помощью микроскопа по стеклянным шкалам, которыми снабжены мерные проволоки) по исследованиям МИИГАиК [10] и опыту работ:

$m_0 = \pm 4,5$ мкм (для одной шкалы), $m_0 = \pm 15$ мкм, для трехкратного отсчитывания по одной проволоке $m_0 \frac{45\sqrt{3}}{\sqrt{3}} = \pm 13,7$ мкм и $m_0 = \frac{5\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \pm 4,1$ мкм.

Из опыта установлено, что 38-метровая суперинварная проволока $\varnothing = 1,70$ мм при натяжении $P=15$ кг¹ наклоняет шкалы на угол, равный $56'$, что при зазоре между центром знака и плоскостью штрихов в $0,2$ мм вносит в отсчет по микроскому погрешность около $3,3$ мкм. $m_1 = \pm 3,3$ мкм, причем составляющая m_1 не зависит от числа отсчетов и проволок. Следовательно суммарная погрешность собственно измерения длины одной проволокой будет

$$m_1 = \sqrt{(3,3)^2 + (4,1)^2 + (3,3)^2} = \pm 6,4 \text{ мкм.}$$

2. Погрешность m_2 эталонирования мерной проволоки (РК)ИТЭФ двумя приемами $\pm 26,6$ мкм, при условии малых изменений длин проволок-эталонов между смежными эталонированиями их в компараторе МИИТДНК; она состоит из систематической погрешности 24 мкм и случайной $11,5$ мкм. Для наших условий, когда измерение производится двумя мерными проволоками

$$m_2 = \sqrt{(24)^2 + \left(\frac{11,5}{\sqrt{2}}\right)^2} = \pm 25,4 \text{ мкм.}$$

3. Погрешность m_3 зависит от точности определения термических коэффициентов α и β и погрешности измерения температуры мерного прибора m_t во время эталонирования - t_0 и измерения - t_m . Для расчета величины погрешностей воспользуемся формулами А.С.Хркевича, приведенными в работе /15/

$$m_{\alpha, \beta} = \pm 0,35(t_m - t_0) \frac{l}{l_{\text{эф}}} \sqrt{0,250 + 0,00091 \{(60 - t_0) - t_m\}^2}, \quad (6)$$

$$m_{t_0} = \pm (\alpha + 2\beta t_m) m_t. \quad (7)$$

По формуле (6) вычисляется средняя квадратичная погрешность в длине мерного прибора из-за неточного знания величин α и β , если последние определены по образцам;

t_0 - температура эталонирования,

t_m - температура измерения,

l - длина мерного прибора,

$l_{обр}$ - длина (образца) проволоки, для которой определены термические коэффициенты α и β

По формуле (7) вычисляется средняя квадратичная погрешность длины меры из-за неточного определения температуры мерного прибора;

m_t - погрешность измерения температуры мерного прибора

Известно /16/, /17/, что термические коэффициенты α и β определяются с погрешностями ± 5 мкм на 24-метровую проволоку и мало влияют на точность результата измерения. Однако величины α и β изменяются с течением времени и подлежат периодическим определениям /11/ стр.220. В таблице 3 приведены изменения величин термических коэффициентов для двух разных плавов суперинварных проволок, используемых в ИТЭФ в период 1958-1972 гг. Проволоки 4797 и 4777 (плавка А), участвующие в измерениях в 1958-60 гг. изменили свои α и β меньше. Проволоки (37-38) и (39-40) (плавка N 31K5), участвующие в измерениях почти непрерывно в период с 1959 по 1967 гг. изменили свои α и β существенно больше (изменились даже знаки α и β см. табл.3) Во всяком случае изменение величин α и β может внести заметную систематическую погрешность, особенно для 38-метровой инварной проволоки.

Таблица 3

Марка плавки и обработки	№ проволоки, длина ее, м	α 58г. на 1м. на 1°С, МКМ	β 58г. на 1 метр на 1°С, МКМ	α 72г. на 1 метр на 1°С, МКМ	β 72г. на 1 метр на 1°С, МКМ	$\alpha = \alpha_{58} - \alpha_{72}$ на 1 метр на 1°С, МКМ	$\beta = \beta_{58} - \beta_{72}$ на 1 метр на 1°С, МКМ
А	4797 $l = 19,0$ м	+0,374	+0,0048	+0,342	+0,0075	+0,032	-0,0027
	4777 $l = 19,0$	+0,421	+0,0042	+0,305	+0,0087	+0,116	-0,0027
N3IK5	(1 образец) $l = 24$ м (37-38)	+0,342	+0,0047	-0,168	+0,0074	+0,510	-0,0027
	(2 образец) $l = 24$ м (39-40)	+0,362	+0,0044	-0,095	+0,0070	+0,457	-0,0026
Инварная лента	0/н $l = 17,0$ м	+0,076	+0,0069	+0,147	+0,0076	-0,071	-0,0007

По нашему мнению, с фактом изменения величин α и β следует считаться и периодически раз в 3-4 года их перепределять, для случая когда речь идет о высокоточных измерениях с помощью инварной проволоки. Величины α и β необходимо определять для каждой проволоки в отдельности, а не по двум образцам каждой плавки и обработки, как было принято в ИТЭФ.

Ошибка в измерении температуры мерных приборов является одним из главных источников погрешностей при точном определении длины меры /11/ стр.221. Правильность вычисления температурной поправки Δl в формуле (I) зависит от погрешностей определения α и β и точности измерения температуры мерного прибора во время компарирования и измерения. Погрешность $m_t = 0,5^\circ\text{C}$ оценена нами из опыта, проведенного в помещении компаратора ИТЭФ, заключавшегося в определении температуры инварной проволоки в лабораторном помещении. Измерения произведены методом контакта с помощью термометра сопротивления БЭП-230 (градуировка 12α) и электронного моста ЭМУА-35. Одновременно этим термометром определяли температуру воздуха. Отличие температуры проволоки от температуры воздуха было в среднем порядка $0,5^\circ\text{C}$. В.В.Шторм в результате обстоятельных исследований /18/ нашел для закрытых помещений, при спокойном состоянии воздуха, что отличие температуры проволоки от температуры воздуха, отсчитываемой по ртутному термометру, не превышает $0,3^\circ\text{C}$. Сценка по (6) и (7) для наших условий работ при $t_0 = +20^\circ\text{C}$, $t_m = +12^\circ\text{C}$, $m_t = \pm 0,5^\circ\text{C}$, $l_{\text{эф}} = 24$ м, для 38-метровой проволоки $\alpha_0 = +13,4$ мкм, $\beta = +0,173$ дает $m_{l_{\alpha\beta}} = 4,4$ мкм, $m_{l_t} = m_{l_{\text{эф}}} = 8,8$ мкм. Следовательно, будем иметь

$$m_3 = \sqrt{(4,4)^2 + (8,8)^2} = \pm 9,8 \text{ мкм}$$

4. Погрешность m_v из-за неодинаковости натяжения мерного прибора при эталонировании и измерения также является одним из основных источников погрешностей при измерении длин линий подвесными мерными приборами. Измерение натяжения изменяет длину меры, причем изменение натяжения на 1 г изменяет длину 24-метровой проволоки на 1 мкм [11], стр. 273. Погрешность в измеряемой линии, обусловленная изменением натяжения, пропорциональна этой длине и вызвана:

1) отклонением веса грузов от заданного;

2) трением в блоках и их перекосом. Если при эталонировании и измерения применять одни и те же блоки, грузы, карабины, струнки с крючками, то они не могут явиться причиной изменения натяжения. В этом случае источником изменения натяжения может быть только наличие трения в блоках, применяемых для подвески проволоки. По опыту работ блоки считаются хорошими, если они "чувствуют" изменение в нагрузке $\Delta P = 4 \pm 5$ г (ΔP - величина трения определена с помощью разновесов). Если в измерениях будут участвовать одновременно два блока, то суммарная погрешность в натяжении составит $5\sqrt{2} = 7$ г. Такое изменение натяжения дает для суперинварной проволоки длиной 38,0 м; $\varnothing 1,70$ мм., при натяжении $P = 15$ кг, погрешность, равную 10,7 мкм, т.е. $m_v = 10,7$ мкм. Расчет произведен по формуле [15/

$$m_v = S_0 \left(\frac{1}{EF} + \frac{\gamma^2 F^2 S^2}{12 P^3} \right) \Delta P, \quad (8)$$

где S_0 - длина мерного прибора; $S_0 = 38,10^2$ см,
 E - модуль упругости инвара, $E = 1,55 \cdot 10^6$ кг/см²; F - площадь поперечного сечения мерного прибора; $F = 227 \cdot 10^{-4}$ см²
 ($\gamma = 8,5 \cdot 10^{-2}$ см²); γ - удельный вес, $\gamma = 8 \cdot 10^{-3}$ кг/см³;
 ΔP - величина трения, $\Delta P = 7 \cdot 10^{-3}$ кгс; P - сила натяжения,
 $P = 15$ кгс.

5. Известно [5], что если отожженную и подвергнутую холодной обработке инварную проволоку оставить под непрерывным натяжением, то она может растягиваться "безгранично". Конечно, скорость удлинения значительно снижается через несколько дней. Так, например, проволока длиной 100 м, находящаяся под натяжением в 20 кг, растягивается приблизительно на 10 мм в минуту в течение первых нескольких минут, а через несколько дней - всего лишь 0,1 мм в минуту. После снятия натяжения за несколько дней проволока возвращается к первоначальной длине. На рис. 5 представлены результаты удлинения суперинварных проволок \varnothing 1,70 мм длиной 6,19, 25 и 38 метров в зависимости от времени применения непрерывного натяжения, полученных в результате эксперимента, проведенного в компараторе ИТЭФ. Цель эксперимента заключалась в оценке погрешности из-за растяжения проволок в условиях измерения длин сторон спорной сети ускорителя ИТЭФ. Эксперимент показал:

а) удлинение проволоки при постоянном натяжении пропорционально длине проволоки и времени применения непрерывного натяжения;

б) удлинение проволоки пропорционально силе натяжения. Из рис. 5 следует, что 38-метровая проволока при натяжении 15 кгс в первую минуту натяжения удлиняется на 8+9 мм. Среднее удлинение в течение первых 6 минут применения натяжения составляет 4 мм в минуту. Следовательно, если при измерениях и компарировании соблюдать одинаковые интервалы времени, когда проволока напряжена (натянута) и моменты отсчитывания при этом соблюдать с точностью до двух минут, то в результате измерения длины 38-метровой проволокой

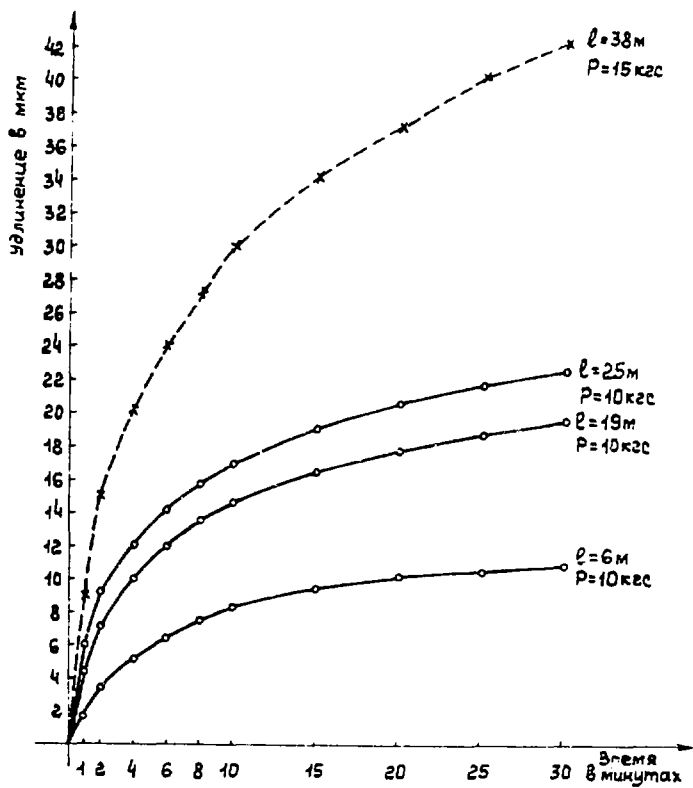


Рис. 5 Удлинение иваркой проболоки в зависимости от времени непрерывного натяжения.

можно внести систематическую погрешность из-за растяжения порядка 8 мкм, т.е. для расчета примем $M_2=8$ мкм. Следует отметить, что при исследовании растяжения проволок использовался обычный блок от БП-2, порог "чувствительности" которого равен ≈ 6 г, что могло внести в результаты исследований (см. рис.5) существенную систематическую погрешность.

6. Основным недостатком инвара является малая его стабильность (молекулярная неустойчивость) /II/, стр.226, что проявляется в изменении длин мерных приборов во времени. Оказалось, что проволоки, учествовавшие в измерении базисов государственной триангуляции СССР, изменяют свою длину как в течение сезона, так и скачкообразно, например, при сотрясении /II/, стр.227, в среднем $\pm 21+26$ мкм на 24-метровую проволоку за рабочий период. Сделать суждение о нестабильности инварной меры можно на основании повторных определений ее длины. Конечно, достоверно об изменениях длины меры можно судить, если последняя в период между эталонированиями не претерпела механических повреждений (изгибание). При строительстве ускорителей частиц используют подвесные мерные приборы разных длин, которые эталонируют на стационарном компараторе с помощью кезла-эталоны (г.Серпухов;ЦЕРН) и рабочем компараторе (ИТЭФ), где в качестве эталона служат проволоки-эталоны, компарируемые на стационарном компараторе МИИ'АиК. В таблице 4 представлены результаты анализа стабильности четырех (I-2), (3-4), (69-70), (71-72) 36-метровых и двух (49-50), (51-52) 25-метровых инварных проволок по разностям d_i длин, полученных из 87 смежных эталонирований в период с

Расчет 4

ℓ = 38,0м

ℓ = 25,0м

№№ п/п	ℓ = 38,0м		ℓ = 25,0м		Приме- чание		
	(3-4) d, мм	(1-2) d, мм	(69-70) d, мм	(71-72) d, мм		(49-50) d, мм	(51-52) d, мм
1.	-1,6	+66,6	+33,4	-4,8	+28,6	+21,0	В сред- них обозна- чен но-
2.	+45,2	+12,8	+13,3	+37,1	-56,9	-7,7	
3.	-37,5	+7,5	-32,0	-30,9	-17,0	+18,0	мер прово-
4.	+11,7	+25,4	+28,0	-12,0	+29,8	+43,2	
5.	+22,0	+64,8	-20,0	+9,0	-24,4	-45,2	мер прово-
6.	-12,2	-69,1	-24,0	+49,0	+4,7	-39,1	
7.	-30,5	-28,1	+63,0	-39,2	+9,6	+15,6	лок
8.	-14,2	+5,6	-1,0	-27,9	-29,7	-60,4	
9.	+42,4	-32,2	-31,0	+10,7	+8,8	-6,7	лок
10.	-44,0	-17,0		+63,8	-55,0	-12,0	
11.	+39,6	-5,0		-19,0	+22,0	-3,0	лок
12.	+1,0	-25,0		-18,0	+6,0	+19,0	
13.	+17,5	+6,0		-54,0			лок
14.	+11,8	+2,0		-7,0			
15.	-9,8			+54,0			лок
16.	+57,1			+46,0			
17.	+26,6						лок
18.	-68,2						
19.	-15,0						лок
20.	+4,0						
21.	+23,0						лок
22.	+18,0						
23.	+31,0						лок
24.	+16,0						

Продолжение табл.4

1	2	3	4	5	6	7	8
	101,9	14,3	29,7	56,8	-73,5	-57,3	$[d]$
	4,2	1,0	3,3	3,6	-6,1	-4,8	$\theta = \frac{[d]}{n}$
22I28,I	I7III;5	8224,4	16140,8	10446,8	12494,7		$[d^2]$
	30,4	35,0	30,2	31,8	29,5	32,3	$m_d = \sqrt{\frac{[d^2]}{n}}$
	21,5	24,7	21,4	22,5	20,9	22,8	$m_l = \frac{m_d}{\sqrt{2}}$

1959 по 1967гг. В смежных эталонированиях участвовали одни и те же проволоки-эталон. Очевидно любое Δl состоит из изменений длины мерной проволоки во времени и случайных погрешностей эталонирования ее на рабочем компараторе. Изменения длины проволоки могут быть как случайные, так и систематические. Из таблицы 4 следует, что случайная часть ($21,8 \pm 22,5$ мкм) в 4-7 раз больше систематической ($+3,0 \pm 5,4$ мкм). Полученная величина средней квадратичной погрешности $m_e = \pm 22,5$ мкм является случайной погрешностью из-за неточного знания длины мерной проволоки. Так как в обработку результатов входит средняя длина проволоки из двух эталонирований, то будем иметь погрешность $22,5/\sqrt{2} = \pm 16$ мкм

Исключив из нее случайную погрешность $\pm 4,7$ мкм (см.табл.2) определения длины мерной проволоки на рабочем компараторе получим величину случайного изменения длины проволоки во времени, т.е. m_6

$$m_6 = \pm \sqrt{(16)^2 - (4,7)^2} = \pm 15,3 \text{ мкм}$$

Здесь уместно отметить, что суммарная погрешность из-за неточного знания длины 38 метровой инварной проволоки с учетом систематической части (± 24 мкм) погрешности ее эталонирования будет $\pm \sqrt{(24)^2 + (16)^2} = \pm 28,8$ мкм. Отметим также, что на основании более, чем десятилетнего опыта работы с инварными проволоками в ИТЭФ мы не наблюдали резких изменений длин проволок. Так, например, по результатам эталонирования до измерений на кольцо и после измерений (см.табл.4) зафиксирована максимальная разность длин равная 69,1 мкм. Однако при измерении радиальных сторон проволоки находились в неблагоприятных условиях. Их перетягивали с центрального знака на кольцо с помощью троса, наматываемого на барабан, подвергая их существенным сотрясениям, что по видимому вызывало некоторое изменение их длин порядка ± 15 мкм. В работе [8] на основании 2430 эталонирований сделано заключение, что нестабильность инвара это миф, который инвару приписывают, что за время десятилетней работы в ЦЕРНе не наблюдали резких изменений длин инварных мер.

7. Когда крайние точки (центры опорных знаков) измеряемой линии расположены на разных уровнях, в результате измерения вводят поправку $\Delta \ell_n$ вычисляемую по известной

формуле

$$\Delta l_h = -\frac{h^2}{2l} - \frac{h^4}{8l^3}, \quad (9)$$

где h - превышение между крайними точками (центрами)
 l - длина измеряемой линии.

При строительстве ускорителей измерительные работы в опорной сети обычно организуют так, чтобы превышения между центрами опорных знаков не оказывались больше 2+3 м. В этом случае поправка за наклон для длин больше 10 м $\leq 0,001$ мм, поэтому в расчетах положим $m_h = 0$. По результатам анализа рассмотренных выше погрешностей линейных измерений рассчитаем ожидаемые средние квадратичные погрешности m_{S_i} измерения сторон опорной сети одной и двумя инварными проволоками. Суммарные погрешности могут быть вычислены по формуле

$$m_{S_i} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 + m_5^2 + m_6^2 + m_7^2} \quad (10)$$

Результаты расчетов ожидаемых погрешностей измерения длин радиуса $m_{S_{31}}$, большой хорды $m_{S_{25}}$, малой хорды $m_{S_{8v}}$ (рис.3) и их составляющих, согласно вышеизложенным соображениям, сведем в таблице 5.

Таблица 5

Наименование средних квадратичных погрешностей	Величины погрешностей в микрометрах					
	Одна проволока			Две проволоки		
	$m_{S_{33}}$	$m_{S_{25}}$	$m_{S_{24}}$	$m_{S_{33}}$	$m_{S_{25}}$	$m_{S_{24}}$
1. Погрешность собственно измерения m_1	6,4	6,4	5,6	5,1	5,1	4,0
2. Погрешность эталонирования m_2	26,6	26,6	12,0	25,4	25,4	10,9
3. Погрешность из-за коэф. и температур. m_3	9,8	5,4	1,8	7,0	3,8	1,3
4. Погрешность из-за натяжения m_4	10,7	5,9	2,0	7,6	4,2	1,4
5. Погрешность из-за растяжения зрета из рис. 5 m_5	8,0	5,0	3,0	5,7	3,5	2,1
6. Погрешность от неотбавки длины меры m_6	16,0	16,0	8,0	11,3	11,3	5,0
Суммарная погрешность m_{Si} вычисленная по формуле (10)	35,8	33,1	16,0	30,6	29,0	18,0

Из таблицы видно, что максимальный вклад в суммарную погрешность (M_{Si}) вносят погрешности M_2 и M_6 . Однако погрешность M_5 может достигнуть величины существенно большей, особенно для 38 метрового проволоки, если не придерживаться методических рекомендаций данных на стр. 6, 31. В расчетах (табл. 5) не учтена погрешность из-за изменения длин проволок-эталонов между смежными эталонированиями. Счевидно погрешность из-за неточного знания длин проволок-эталонов складывается из погрешности эталонирования их на стационарном компараторе и изменения их длин после эталонирования. До сих пор предполагалось, что такие изменения малы по величине, не превосходят погрешностей эталонирования. В таблице 6 приведена оценка погрешности из-за изменения длин двух проволок-эталонов

Таблица 6

Дата	Темпер. t °C	Длина L	Раз- ность d мкм	Скорость в месяц V мкм/мес
<u>Проволока (39-40) $L = 18,983$</u>				
3.08.59г.	+21,6	19-17,103мм	-31	-10
10.11.59г.	+18,4	19м-17,134		
11.12.59г.	+16,6	19м-17,134	0	0
12.10.60г.	+18,6	19м-17,276	-142	-14
18.04.61г.	+19,0	19м-17,321	-45	-8
7.12.61г.	+17,9	19м-17,416	-95	-12
10.7.62г.	+19,2	19м-17,407	+9	+1
20.12.62г.	+18,6	19м-17,440	-33	-7
20.06.63г.	+19,7	19м-17,530	-90	-15

$$\sum d = -427 \quad \sum V = 65$$

$$d_{cp} = -53 \quad V_{cp} = 8,1$$

Продолжение табл.6

Проволока (77-78) $L = 6,018\text{м}$

3.12.59г.	+17,6	6м+18,694	+8	+1
22.10.60г.	+18,4	6м+18,702	-47	-8
18.04.61г.	+19,1	6м+18,655	-67	-8
13.12.61г.	+17,8	6м+18,588	-28	-6
12.07.62г.	+19,6	6м+18,560	-40	-7
16.01.63г.	+16,7	6м+18,520	-47	+8
19.07.63г.	+19,4	6м+18,567		

$$\sum d = -127 \quad \sum V = -20$$

$$d_{\text{ср}} = -21 \quad V_{\text{ср}} = -3,5$$

длиной 19 м и 6м для наших условий эталонирования, транспортировки и хранения их. В таблице 6 через V обозначена скорость изменения длины проволоки в месяц, предполагал, что это изменение происходит линейно, хотя это может быть и не совсем так. Если среднюю скорость изменения длины проволок-эталонов в месяц принять за погрешность из-за изменений их длин, то суммарную погрешность измерения радиальной стороны одной 38-метровой инварной проволокой следует ожидать около 40 мкм.

Результаты измерений. Оценка точности результатов линейных измерений

В табл.7 приведены некоторые результаты измерений деформаций кольцевого фундамента, выполненные по описанной выше методике в период с 1959 по 1967 г.г. Здесь же дана температура бетона. Из таблицы следует, что

Таблица 7

№ цик- ла	Дата измере- ний	Средняя тем- пература бе- тона		Максимальн разн. темпер.		Средняя радиаль- ная де- форм., мм	Максимальная неравномерная деформация $R_{\max} - R_{\min}$ мм
		$t^{\circ}\text{C}$ верх	$t^{\circ}\text{C}$ низ	верх	низ		
1	13.Х.59	+10,0	+11,8	1,0	2,9	0,00	0,0
2	25.ХІ.59	+12,3	+11,4	1,9	5,8	+0,92	0,7
3	24.ХІІ.59	+12,1	+11,9	2,0	6,9	+0,96	0,8
4	05.І.60	+11,3	+11,6	1,6	4,9	+0,91	0,9
5	2.02.60	+10,6	+10,4	1,2	5,5	+0,68	0,8
6	5.03.60	+10,2	+9,8	1,6	3,3	+0,70	1,1
7	5.04.60	+14,0	+12,1	1,4	5,3	+1,31	0,9
8	8.06.60	+18,8	+16,2	0,7	4,5	+2,48	2,0
9	28.03.60	+19,1	+17,5	1,3	1,5	+2,88	2,5
10	23.11.60	+18,9	+20,2	1,8	6,7	+2,38	2,7
11	22.01.61	+19,3	+19,4	1,5	3,8	+2,60	3,2
12	11.03.61	+17,5	+20,3	1,5	2,5	+2,65	3,8
13	25.04.61	+18,7	+19,4	0,8	2,3	+2,35	3,2
14	14.07.61	+22,0	+20,0	0,6	1,3	+3,05	3,2
15	10.01.62	+16,3	+17,5	1,8	3,4	+1,68	3,0
16	10.04.62	+19,0	+17,2	1,0	2,6	+1,80	2,8
17	30.07.62	+19,3	+17,7	0,5	0,6	+2,13	2,8
18	5.11.63	+20,1	+19,7	1,5	2,4	+1,76	2,8
19	24.03.63	+23,2	+20,9	0,4	0,7	+2,77	2,6
20	7.03.64	+20,5	+19,9	1,7	1,8	+1,59	2,5
21	15.03.65	+21,1	+20,1	0,8	1,6	+1,80	2,8
22	2.06.67	+20,1	+18,9	0,6	0,8	+1,44	2,3

увеличение длины среднего радиуса было обусловлено повышением температуры бетона, причем изменение ее на $+1^{\circ}\text{C}$ соответствует увеличению радиуса на 0,3 мм. Вычисленный при этом коэффициент корреляции оказался равным $r = +0,83$.

Оценка точности результатов линейных измерений выполнена по двойным измерениям каждой линии двумя мерными проволоками. Результаты оценки приведены в таблице 8. Из таблицы следует, что результаты измерений содержат существенные остаточные систематические погрешности, максимальное значение которых $\theta = 20,3$ мкм. Величины вычисленных таким образом погрешностей, по-видимому, значительно преуменьшены вследствие неучтенной погрешности из-за неточного знания длин мерных приборов и других систематических погрешностей, существенно погашенных в разностях d_i . Более правдоподобная оценка точности линейных измерений выполняется по невязкам, возникающим в геодезической сети. В работах [1], /19/ средняя квадратичная погрешность измерения стороны m_s , подсчитанная по невязкам 14 четырехугольников первого цикла измерений, равна ± 37 мкм, по невязкам второго цикла ± 33 мкм.

Об использовании инварных лент

При установке блоков в расчетное положение и измерении расстояний в опорной сети ускорителя ИТЭФ используются также инварные ленты поперечного сечения $6 \times 0,6$ мм² длиной от 3 до 17 м. Ленты длиной 10 м и 17 м разделены на дециметры; в начале, середине и конце имеются дециметровые шкалы, разделенные на миллиметры (изготовлены для измерений в опорной сети в 1958 г. в-дом "Аэрогеопробор"). Каждая лента хранится наверху на особое деревянное колесо диаметром

0,23м, уложенное в малогабаритную коробку. Среди этих лент имеются три комплекта (№ 200; № 300; № 400) таких, которыми можно измерить любое расстояние от 0 до 10 м (изготовлены для установки блоков ускорителя ИТЭФ 3-дом № 106 в 1959г).

В один комплект входит восемь следующих лент:

1. Длина 3м, разделена через 1 мм по всей длине
2. Длина 4м; разделена через 1 мм первый дециметр и последний метр
3. Длина 5 ; -- -- --

.....

8. Длина 10 м; -- -- --

Более чем десятилетний опыт работы с инварными лентами в производственных и лабораторных помещениях на ускорителях ИТЭФ и в Серпухове показал, что ленты по сравнению с проволочками более прочны, менее подвергнуты изгибанию, не имеют кручения, удобны при измерениях и т. транспортировке, а главное более стабильны во времени. В таблице 9 приведены некоторые результаты эталонирования таких лент. Через α мм обозначена разность длин, полученных из смежных эталонирований, через ν — скорость изменения длины ленты в месяц, предполагая что это изменение происходит линейно. Максимальное изменение длины за месяц имеет лента № 5; это изменение составляет 65 мкм и получено спустя два месяца после изготовления ленты. Из таблицы можно заключить, что абсолютные величины ν со временем уменьшаются, и что ленты за 8-12 лет практически не изменяли свою длину.

**Оценка точности линейных измерений по
двойным измерениям (двумя проволоками)**

Таблица 8

Дата измерения	Радиусы $S=33,0\text{м}$		Большие $S=25,02\text{м}$ хорды		Малые $S=8,4\text{м}$ хорды	
	m_d , мкм	θ , мкм	m_d , мкм	θ , мкм	m_d , мкм	θ , мкм
13.10.59г.	16,6	3,7	8,5	-10,0	25,0	+2,0
25.11.59г.	22,0	+15,0	10,0	-11,0	13,0	-18,0
5.04.60г.	22,6	-1,5	12,0	+4,4	12,2	+1,3
8.06.60г.	18,3	+20,3	10,0	+1,4	11,0	-1,1
23.11.60г.	21,6	+16,3	11,0	+10,0	10,0	+13,5
5.05.61г.	13,3	-11,0	9,0	-8,1	14,3	-4,8
10.01.62г.	24,0	+4,6	21,4	-8,9	23,3	+3,5
10.04.62г.	15,3	-13,0	8,7	-13,4	11,6	-14,2

$$m_d = \sqrt{\frac{[d^2]}{2(n-1)}} \quad \theta = \frac{[d]}{n}$$

По разностям двойных измерений был также вычислен коэффициент случайного влияния M_g по известной формуле $M_g = \sqrt{\frac{[d^2]}{2(n-1)}}$ среднее значение которого для восьми циклов измерений составило: для радиальных сторон $M_{g_{cp}} = \pm 2,8$ мкм; для больших хорд $M_{g_{cp}} = \pm 2,7$ мкм; для малых хорд $M_{g_{cp}} = \pm 5,0$ мкм.

Таблица 9

Оценка погрешности за изменение длины
сварных лент

Дата	Темпер. t °C	Длина L	Раз- ность d , мкм	Ско- рость в м-ц $\frac{d}{L \cdot t}$	Длина L	Раз- ность d , мкм	Ско- рость $\frac{d}{L \cdot t}$ мкс.
<u>Лента № 5</u>					<u>Лента № 5</u>		
20.12.58	+16,9	17м-1,81мк	-120	-60	17м-0,86	+130	+65
18.02.59	+17,2	17м-1,93	-80	-40	17м-0,73	+40	+20
15.04.59	+18,8	17м-2,01	-120	-4	17м-0,69	0	0
18.10.61	+18,9	17м-2,13	-110	-4	17м-0,59	-100	-4
15.02.64	+17,7	17м-2,24	+80	+2	17м-0,73	+90	+2
13.12.66	+20,2	17м-2,16			17м-0,70		

$$\Sigma d = -350 \Sigma t = 106$$

$$\Sigma d = +160 \Sigma t = 8,3$$

$$d_{cp} = -70 \frac{1}{L \cdot t} = -21,2$$

$$d_{cp} = +32 \frac{1}{L \cdot t} = +16,6$$

<u>Лента № 200</u>			<u>Лента № 201</u>				
19.11.59	+17,8	3м-0,333	-6	-	3м-0,281	+1	-
27.11.59	+17,9	3м-0,339	+29	-	3м-0,280	+4	-
09.03.60г	+17,9	3м-0,310	-27	-	3м-0,276	+16	-
15.04.61	+18,8	3м-0,337	-40	-	3м-0,260	-29	-
12.07.62	+19,9	3м-0,377	+30	-	3м-0,289		
01.10.71	+19,6	3м-0,347	-23				
17.01.73	+19,0	3м-0,370					

$$\Sigma d = -37$$

$$\Sigma d = -8$$

$$d_{cp} = -6,2$$

$$d_{cp} = -2,0$$

Измерение расстояний с помощью дистинвара и уровня динамометра

Описанная выше методика линейных измерений с помощью инварных мерных приборов (проволок, лент) с прецизионными блоками позволила получить высокую точность, характеризуемому относительной погрешностью 10^{-6} . Однако из нашего опыта измерений можно заключить, что сам процесс измерений трудоемкий и малопродуктивный (см. стр. 9). В ЦЕРНе для высокоточных линейных измерений создан оригинальный прибор, названный дистинваром [8], использующий инварную проволоку, но позволяющий измерять длины без применения блоков, блочных устройств, отсчетных микроскопов, грузов, карабинов, пристяжных струнок. Основными узлами дистинвара являются:

1) инварная проволока; 2) микрометрический винт высокой точности; 3) стальной нож, качающийся в шарикоподшипнике, 4) пузырьковый уровень, обеспечивающий воспроизводимость измерений. Дистинвар - высокопроизводительный прибор, надежен в обращении, позволяет в несколько раз быстрее производить точное измерение расстояний по сравнению с измерениями с применением прецизионных блоков. В лабораторных условиях с помощью дистинвара измеряют расстояния до 50 м, воспроизводимость результатов с точностью ± 10 мкм. Однако при измерении расстояний дистинвар переносит прилагаемое натяжение проволоки на опорные знаки, которые должны быть устойчивыми, чтобы не испытывать деформаций. При измерении расстояния 50 м в полевых условиях получена погрешность ± 38 мкм из 990 результатов.

В 1966г. при сооружении Серпуховского ускорителя разработана и опробована прибор ВУД (высокоточный уровеньный дилатометр) /20/, в основу которого положена принципиальная схема дилативара. Прибор ВУД работает по принципу кругового математического маятника, положение которого в вертикальной плоскости фиксируется пузырьковым уровнем. Результаты лабораторных исследований показали, что прибор ВУД прост и удобен в обращении, надежен в работе. Два человека производят измерение одной линии длиной 24,4 м за 12 мин, воспроизводимость результатов с точностью $\pm 10 + 15$ мкм. ВУД применяется также при измерении наклонных линий /21/.

Выводы

1. Разработанная МИИГАиК, примененная и развитая в ИТЭФ, методика линейных измерений инварной проволокой с использованием на месте измерений рабочего компаратора огановарного типа (вместо жезла-эталоны используется проволоки-эталоны) позволила получить точность измерения расстояний до 40м длиной со средней квадратичной погрешностью < 40 мкм.

2. По материалам эталонирования получена точность эталонирования мерных проволок 38,0 м и 25,02 м, равная ± 27 мкм. Оценена нестабильность этих проволок во времени, достигающая ± 16 мкм с остаточной систематической составляющей 3-5 мкм.

3. Приведены данные о нестабильности длины проволок-эталонных, а также инварных лент (см. табл. 6 и 9). Из таблицы следует, что ленты более стабильны во времени по сравнению с проволоками. Ленты меньше подвергнуты механическим

повреждениям; удобны в работе и транспортировке, а потому предпочтительнее в измерениях в закрытых и лабораторных помещениях.

4. Исследовано удлинение сварных проволок длиной 6, 19,25 и 38 м в зависимости от времени приложения непрерывного натяжения. Показано, что погрешность из-за растяжения может достигать существенной величины особенно для 38-метровой проволоки (см. рис. 5). Даны рекомендации об уменьшении погрешности из-за растяжения при измерении расстояний сварными проволоками.

5. Получены данные об изменении термических коэффициентов α и β во времени для сварных проволок и лент (см. табл. 3)

6. Сообщаются некоторые результаты многолетних измерений плановых деформаций кольцевого фундамента. Удлинение среднего радиуса вызвано повышением температуры бетона, причем изменение температуры бетона на $+1^{\circ}\text{C}$ вызывает увеличение среднего радиуса на 0,3 мм. Коэффициент корреляции при этом равен $+0,93$.

7. Приведены краткие сведения об измерении расстояний сварной проволокой без применения прецизионных блоков, блочных станков, грузов, с помощью дилативара и высокоточного уровня динамостата.

Автор выражает глубокую благодарность В.В. Владимирскому и В.В. Соколовскому за предоставленную возможность выполнить работу. Кроме того, автор благодарен Кожевникову Г.Д.,

Котлову А.А., Чичачкину В.И., Душиной Н.А. за участие в измерениях и обработке результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марфенко С.В., Певнев А.К.,
Порубай Н.И. Точная установка магнитов протонно-го синхротрона. ИТЭ, № 4, 1962, с.55-65.
2. Владимирский В.В., Кобозев А.С.,
Марфенко С.В., Певнев А.К.,
Порубай Н.И., Тарасов Е.К. Влияние деформации фундаменте на орбиту протонов в синхротроне. ИТЭ, № 4, 1962.
3. Порубай Н.И., Сивков Ю.П. Анализ результатов геодезических измерений на фундаменте электромагнита ускорителя ИТЭФ на 7 ГэВ. "Известия вузов". Серия "Геодезия и аэрофотосъемка", вып.3, 1966. Также препринт ИТЭФ, 1964, № 251.
4. Порубай Н.И. Определение положения точек угловыми пространственными засечками в сильном магнитном поле. М., Препринт ИТЭФ, 1973, № 58.
5. Desae A.E. Precision survey of the 28 BeV Synchrotron in the European Organisation for Nuclear Research. Empire Survey Review, No 121,122,123, 1961, vol.XVI.
6. Captain R.S. Reading Precise Survey of the 25 MeV Synchrotron at Brookhaven National Laboratory. Surveying and Mapping, vol.XIII, No 3, 1959.
7. Magzahn K. Vermessungsarbeiten für das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg. Veröft.Dtsch. geod.Komm.Bayer Akad.Wiss. B,Nr.95,42,159-169, 1963.
8. Ger va i s e J. Mesure de distances de haute précision au fil d'invar en micro-geodésie. Geometre,1965,N12,dec.
9. Ger va i s e J. High precision Survey and Alignment Techniques in Accelerator Construction. CERN, Geneva, April 19, 1974.
10. Мурьев в М.С. Геодезические работы особо высокой точности при монтаже сложных крупногабаритных машин. "Известия вузов". Серия "Геодезия и аэрофотосъемка", вып.6, 1958.

11. Красовский Ф.Н. Избранные сочинения, т.3, М., Геозиздат, 1955.
12. Кондрашков А.В., Ларин П.И. Компаратор МИИГАиК для эталонирования мерных приборов длиной от 1 дм до 24 м. "Известия вузов". Серия "Геодезия и аэрофотосъемка". М., 1963, вып.3.
13. Шерман Д.С. Руководство по камеральной обработке базисов I, 2 и 3 классов. М., Геозиздат, 1961.
14. Кондрашков А.В. О точности определения длин инварных проволок на геодезических компараторах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 1946.
15. Марфенко С.В. Исследование методов высокоточных геодезических измерений при строительстве кольцевых и линейных ускорителей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 1964.
16. Ларин Б.А. О термических коэффициентах инварных проволок. Труды ЦНИИГАиК, вып.94, М., Геозиздат, 1963.
17. Сапунова Д.В. Новый метод определения термических коэффициентов инварных проволок. "Геодезия и картография", № 7, 1963.
18. Шторм В.В. Результаты исследований температуры инварных мерных проволок и жезлов, используемых при высокоточном монтаже оборудования физических лабораторий. В сб. "Вопросы атомной науки и техники", серия "Проектирование", вып.1, М., ЦНИИАтоминформ, 1974.
19. Марфенко С.В. Опыт высокоточных геодезических работ при монтаже протонного синхротрона на 7 ГэВ. "Известия вузов". Серия "Геодезия и аэрофотосъемка", вып.4, 1963.
20. Голубцов А.И. Высокоточный уровеньный динамостат. "Известия вузов", Серия "Геодезия и аэрофотосъемка", вып.5, 1968.

21. Ш т о р м В.В., Ж и д к о в А.А. Измерение наклонных линий уровнем динамометром. В сб. "Вопросы атомной науки и техники", серия "Проектирование", вып.5, ЦНИИАтоминформ, 1972.



Работа поступила в ОРТИ 15/IX-1977г.

Подписано к печати 3/X-77г. Т-16646. Формат 70 x 108 1/16.
Печ.л.3,25.Тираж 220 экз.Заквз 125.Цена 17 коп.Индекс 3624.

Отдел научнс-технической информации ИТЭФ, П17259, Москва