

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
им. М.В. Келдыша**

**В.А.Карташев, Т.Ф.Бурухина**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТКЛОНЕНИЙ ИГЛЫ  
ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА ОТ НАКЛОНА ЕГО ОСИ**

**Москва - 2004**

## Аннотация

В работе исследуется зависимость смещения иглы туннельного микроскопа от наклона его оси. Эта зависимость должны учитываться на этапе проектирования и в процессе интерпретации измерений. Проведенные эксперименты подтверждают правильность выбранной модели для объяснения зависимости.

Ключевые слова: сканирующий зондовый туннельный микроскоп, чувствительность к возмущениям

## DEPENDENCE OF TIP DISPLACEMENTS FROM INCLINING OF TUNNEL MICROSCOPE BODY

**V.Kartashev, T.Buruhina**

Dependence between tip displacements of STM and inclining of its axis is investigated. This dependence should be taken into account on the stage of designing of STM and in interpretation of measurements. Experiments confirm existing of the dependence and appropriateness of used theoretical models.

Key words: Scanning probe tunnel microscope, sensitivity to disturbances

Работа выполнена по программе 3.5 Отделения математики РАН «Математическое моделирование в химических и нанотехнологиях»

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Математическая модель зависимости наклона оси туннельного микроскопа от наклона его основания	4
§ 1. Конструкция туннельного микроскопа НАНОЦЕНТРА	5
§ 2. Математическая модель угла наклона оси микроскопа	6
Выводы к главе 1	10
Глава 2. Исследование влияния наклона опоры туннельного микроскопа НАНОЦЕНТРА на отклонение иглы	10
§ 1. Вычисление горизонтальных и вертикальных отклонений иглы, вызванные наклоном основанием микроскопа	11
§ 2. Влияние статической неопределенности на точность движение иглы микроскопа	16
Выводы к главе 2	17
Глава 3. Исследование влияния наклона основания на положение иглы туннельного микроскопа НПО АЛМАЗ	17
§ 1. Конструкция туннельного микроскопа НПО АЛМАЗ	18
§ 2. Зависимость положения иглы от наклона основания микроскопа конструкции НПО АЛМАЗ	19
§ 3. Экспериментальная проверка зависимости положения иглы от наклона оси измерительного блока	22
Выводы к главе 3	22
Выводы и рекомендации	24
Литература	24

## ВВЕДЕНИЕ

Туннельный микроскоп позволяет исследовать поверхность с разрешением менее 0,1 нанометра. При таком разрешении становятся различимы атомы, из которых состоит поверхность.

Не менее важной возможностью является способность туннельного микроскопа осаждать на поверхность молекулы вещества, которое окружает иглу. Это достигается с помощью кратковременного электрического разряда между иглой и поверхностью. При этом удается формировать объекты с точностью до 1 нанометра.

Таким образом, при использовании туннельного микроскопа критическими размерами являются менее 0,1 нанометра и 1 нанометр. Такие расстояния являются непривычно малыми даже для современной техники и их достижение связано с определенными трудностями при разработке и эксплуатации туннельных микроскопов.

Причина затруднений состоит в необходимости уменьшить до приемлемой величины амплитуды возмущений, которые действуют на туннельный микроскоп со стороны внешней среды. Традиционные решения являются слишком громоздкими, технологически сложными и, как следствие, дорогими.

В этой связи представляют интерес исследование механизмов действия возмущений на положение иглы микроскопа.

В предыдущей работе [1] показано, что помимо традиционных механизмов действия возмущений, связанных с колебаниями конструкции микроскопа, существует также нетрадиционный механизм, связанный со вторичными эффектами. Его действие обусловлено изменениями деформации конструкции микроскопа при наклоне оси.

В традиционной технике действие таких факторов чрезвычайно мало и, поэтому, может служить оправданием для пренебрежения ими. Однако, они оказываются существенными при измерениях с разрешением меньше 1 нанометра.

Настоящая работа посвящена исследованию зависимости перемещения иглы от наклона оси микроскопа. Величина этой зависимости определяет чувствительность перемещений иглы к наклону (в статике) и раскачиваниям (в динамике) оси микроскопа.

В работе рассмотрено два микроскопа один - конструкции НАНОЦЕНТРА, второй НПО АЛМАЗ. Оба прибора основаны на измерении рельефа поверхности с использованием туннельного эффекта.

Для обоих приборов выявлена целесообразность увеличения жесткости их измерительных частей, которое позволило существенно уменьшить влияние внешних воздействий (например, колебаний основания). Просчет в проектировании приборов, по-видимому, связан с отсутствием у конструкторов достаточного опыта в масштабировании представлений окружающего нас мира к размерам наномира.

Предлагаемая работа ставит перед собой две цели:

- Получить оценки влияния найденного эффекта на точность работы микроскопов и дать способы для его расчета.
- Подготовить математическое обоснование экспериментов по измерению эффекта его на приборах.

Работа состоит в оценке вектора перемещения иглы при наклонах оси микроскопа по различным осям.

Результаты расчетов показывают, что величина отклонений достаточно велика (соизмерима с 1 микроном по каждому из направлений). Кроме того, имеется взаимозависимость между направлениями, которое проявляется в том, что отклонение по горизонтальной оси приводит к отклонениям по вертикали.

Эксперименты, выполненные на туннельном микроскопе, подтвердили наличие зависимости отклонений иглы от наклона его оси с точностью до порядка величин, причем предсказанное и измеренное значения оказались в достаточной мере близки.

## **Глава 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ НАКЛОНА ОСИ ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА ОТ НАКЛОНА ЕГО ОСНОВАНИЯ**

Наиболее вероятными воздействиями на микроскоп являются такие, которые приводят к колебаниям основания и наклону его оси. Влияние первых было рассмотрено в работе [1]. В настоящей главе рассматривается зависимость перемещения иглы от наклона основания.

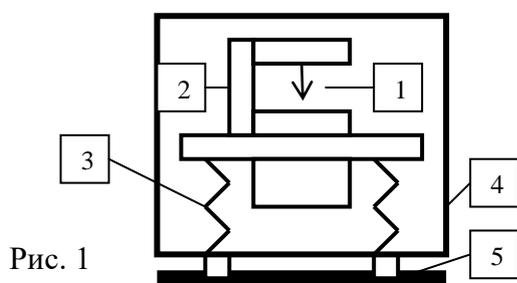
Зависимость перемещения иглы от наклона основания туннельного микроскопа возникает из-за деформации цепочки конструктивных элементов, которые соединяют площадку для размещения исследуемых образцов с иглой.

Высокие требования, предъявляемые к точности движения иглы туннельного микроскопа, вынуждают разработчиков применять специальные технические решения, которые обеспечивают уменьшение влияния внешних возмущающих факторов механической природы. В туннельном микроскопе конструкции НАНОЦЕНТРА для этого используется мягкий пружинный подвес.

По этой причине перед тем, как перейти к расчету зависимости перемещения иглы от наклона оси микроскопа, необходимо найти насколько пружинный подвес уменьшает угол наклона основания.

## § 1. Конструкция туннельного микроскопа НАНОЦЕНТРА

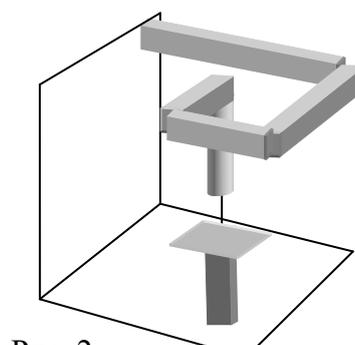
На рис. 1 изображена схема туннельного микроскопа конструкции НАНОЦЕНТРА. Он состоит из:



- блока пьезодвигателей (2), которые приводят в движение иглу (1),
- пружинного подвеса (3),
- кожуха (4),
- опор (5).

Блок пьезодвигателей показан на рис. 2.

Пьезодвигатели обеспечивают грубое (с шагом 0,3 микрона) и точное (с шагом 0,1 нанометра) перемещение иглы. Блок представляет собой балочную конструкцию, на конце которой (в виде ци-



линдра) располагаются пьезодвигатели и игла.

Стол с исследуемым образцом находится снизу. Он опирается на привод грубого вертикального перемещения.

Пружинный подвес обеспечивает уменьшение влияния внешних воздействий на измерительную часть микроскопа. Для увеличения эффективности действия пружины подвеса сделаны достаточно мягкими: их коэффициент упругости равен всего 40 Н/м.

Балочная конструкция выполнена в виде алюминиевых стержней с сечением 1 см x 1 см и длиной 5 см. В работе [1] показано, что деформация стержней под действием силы тяжести приводит к прогибу конструкции на 1 микрон. Этот прогиб компенсируется при настройке микроскопа, путем подъема стола с исследуемым образцом до появления туннельного тока.

Туннельный ток возникает при расстоянии 0,5 нанометра между иглой и образцом. Малая величина этого зазора приводит к тому, что процесс измерения оказывается весьма чувствительным к действию внешних возмущений. В виду сложной геометрии распределения масс расчет влияния возмущений оказывается достаточно сложной задачей. Эта задача дополнительно усложняется тем, что используемые для вычислений формулы выведены в линейных приближениях, так как величина членов, которыми пренебрегают, обычно имеют порядок нанометров. В итоге в расчетах с точностями порядка нанометров приходится учитывать вторичные эффекты. Например, оказалось [1], что раскачивание оси микроскопа при колебаниях основания приводит к наклону оси измерительного блока и вследствие этого к отклонениям иглы в силу изменений деформаций под действием силы тяжести. Расчеты показали, что вклад этого эффекта в амплитуду колебаний иглы на порядок больше, чем поступательных колебаний, которые обычно исследуются в расчетах.

## **§ 2. Математическая модель изменения угла наклона оси микроскопа**

Найдем, насколько пружинный подвес уменьшает угол наклона основания. Для этого решим задачу статики в предположении, что угол наклона опоры мал.

В обозначениях рис. 1: (1) – измерительный блок, который подвешен на пружинных опорах (2). Введем следующие обозначения:

$OaXaZa$  – абсолютная система координат,

$OoXoZo$  – абсолютная система координат, связанная с опорой (точка  $Oo$  совпадает с серединой основания),

$Om$  – центр пружинного подвеса,

$OmXmZm$  – система координат, связанная с микроскопом,

$\alpha$  - угол наклона опоры, отсчитываемый от вертикали,

$\beta$  - угол наклона системы координат  $OmXmZm$  относительно системы координат  $OoXoZo$ , отсчитываемый от вертикали,

$m$  – масса микроскопа,

$mg$  - вектор силы тяжести,

$N_1$  и  $N_2$  – векторы сил давления пружин на микроскоп,

$h$  – вектор центра масс в осях  $OmZm$  (предполагается, что он направлен по оси  $OmZm$ ),

$l$  – расстояние от точки  $Om$  до точки подвеса микроскопа.

Отклонение оси микроскопа от вертикали приводит к неравномерному сжатию пружин. В результате угол  $\beta$  отличается от угла  $\alpha$ .

В векторной форме задача статики, описывающие наклоненное положение микроскопа содержит уравнение равенства сил и моментов. Запишем их в векторной форме. Баланс сил, действующих на микроскоп:

$$N_1 + N_2 + mg = 0.$$

Баланс моментов сил относительно точки  $Oe$ :

$$[h, mg] + [l_1, N_1] + [l_2, N_2] = 0.$$

Запишем эти уравнения в координатной форме в абсолютных осях  $OoXoZo$ .

Напомним, что они связаны с опорой и наклонены вместе с ней на угол  $\alpha$  (рис. 2).

Непосредственно из рисунка следует, что рассматриваемая задача эквивалентна за-

даче, в которой микроскоп располагается вертикально, а сила тяжести направлена под углом к вертикальной оси.

В проекции на оси  $OoXo$  и  $OoZo$  равенство сил приводится к виду:

$$N_1x + N_2x = mg \sin \alpha,$$

$$N_1z + N_2z = -mg \cos \alpha.$$

Принимая во внимание малость угла  $\alpha$ , с точностью до членов второго порядка получим

$$N_1x + N_2x = mg \alpha,$$

$$N_1z + N_2z = -mg.$$

Левая и правая пружины находятся в одинаковых условиях, поэтому горизонтальные составляющие сил сжатия пружин пропорциональны смещению центра микроскопа – точки  $O_m$  относительно центра основания – точки  $Oo$ .

При малых значениях угла наклона опоры можем записать:

$$N_1x = N_2x = N x \approx -k d. \quad (1)$$

Здесь:

$k$  – коэффициент упругости пружин,

$d$  – смещение центра микроскопа, которое имеет порядок величины угла наклона опоры.

Вертикальные составляющие отличаются от половины силы тяжести на величину дополнительного сжатия правой пружины и растяжения левой пружины, которое вызывается действием момента силы тяжести. При малых углах наклона опоры

$$N_2z \approx -\frac{mg}{2} + k l \beta,$$

$$N_{1z} \approx -\frac{mg}{2} - k l \beta.$$

В этих выражениях предполагается, что коэффициенты упругости пружин равны как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

Из рис. 2 следует, что в линейном приближении (для угла наклона опоры  $\alpha$  и угла  $\beta$ ) момент сил натяжения пружин относительно оси  $O_M U_M$  равен

$$-l N_{1z} + l N_{2z} + l N_{1x} \beta - l N_{2x} \beta.$$

С учетом малости горизонтальных составляющих сил давления пружин на микроскоп в линейном приближении для их момента относительно оси  $O_M U_M$  получаем:

$$l(-N_{1z} + N_{2z}) + l\beta(N_{1x} - N_{2x}) = -2l^2 k \beta.$$

Вычисления показывают, что момент силы тяжести относительно оси  $O_M U_M$  дается равенством

$$[h, mg]_y = h mg (\alpha + \beta).$$

Таким образом равенство моментов приводится к виду

$$-2l^2 k \beta + h mg (\alpha + \beta) = 0.$$

Из этого уравнения находим угол  $\beta$ :

$$\beta = \frac{hmg\alpha}{2l^2 k - hmg}.$$

Вернемся к исследованию угла наклона оси микроскопа относительно вертикали при наклоне основания. Из рис. 1 следует, что этот угол равен сумме углов  $\alpha$  и  $\beta$ .

Обозначим через  $\gamma$  угол наклона оси микроскопа относительно оси  $OaZa$ . Исходя из полученных соотношений, имеем

$$\gamma = \alpha + \beta = \frac{2l^2 k \alpha}{2l^2 k - hmg} = \frac{\alpha}{1 - \frac{hmg}{2l^2 k}}.$$

Подставляя параметры, которые соответствуют микроскопу [1] ( $l = 7,5$  см,  $h = -2$  см,  $mg = 10$  Н,  $k = 20$  Н/м), получим:

$$\gamma \approx \frac{\alpha}{10}.$$

Это означает, что пружинный подвес достаточно хорошо компенсирует наклон основания микроскопа, так как угол наклона его оси уменьшается на порядок.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

1. Для туннельного микроскопа конструкции НАНОЦЕНТРА построена математическая модель зависимости угла наклона измерительного блока от наклона основания микроскопа.
2. Исследование найденной зависимости показывает, что пружинный подвес обеспечивает десятикратное уменьшение наклона оси измерительного блока по сравнению с величиной наклона основания микроскопа.

## Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТКЛОНЕНИЙ ИГЛЫ ОТ НАКЛОНА ОПОРЫ ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА НАНОЦЕНТРА

Наклон оси микроскопа приводит к изменению ориентации силы тяжести по отношению к конструкции микроскопа. В результате изменяются деформации в

конструкции, и, как следствие, возникает отклонение иглы от того положения, которое она занимала в начале сканирования.

Направление и величина этих отклонений зависит от конструкции микроскопа. Они могут быть вычислены при использовании известных формул сопротивления материалов и теории упругости. При исследовании влияния прогиба конструкции под действием силы тяжести они были вычислены в работе [1]. Исследование показало, что прогиб конструкции должен учитываться при расчете перемещений иглы, вызванных динамическими возмущениями в горизонтальной плоскости, которые приложены к основанию. Действие силы тяжести сказывается при раскачивании оси микроскопа, которое возникает вследствие сжатия и растяжения пружин подвеса при колебаниях основания в горизонтальной плоскости, которые вызываются возмущениями.

В настоящей главе исследуется зависимость смещения иглы туннельного микроскопа от угла наклона его основания. Эта зависимость определяется эллипсом перемещений иглы под действием силы тяжести конструкции узла, к которому игла крепится.

В предыдущем работе вычислена полуось эллипсоида, направленная вдоль вертикальной оси. По сравнению с точностью измерений, проводящихся с помощью туннельного микроскопа (0,1 нанометра), ее величина оказалась достаточно большой – порядка 1 микрона.

В настоящей главе вычисляется одна из двух горизонтальных полуосей и делаются оценки допустимой подвижности опоры, при которых обеспечиваются требуемая точность работы микроскопа.

## **§ 1. Вычисление отклонения иглы под действием горизонтальной составляющей силы тяжести**

Действие силы тяжести вызывает деформацию конструкции микроскопа. Перемещение иглы, которое при этом возникает, учитывается при выведении иглы в рабочее положение.

Изменение вектора действия силы тяжести изменяет деформации конструкции микроскопа. Возникающие при этом упругие перемещения иглы система управления не учитывает. Эти отклонения могут быть направлены как вдоль оси иглы, так и перпендикулярно ей.

Если микроскоп проводит измерения рельефа поверхности с точностью до 1 нанометра, то в горизонтальном направлении допустимо отклонение также порядка 1 нанометра. Требования к точности движения по вертикали существенно выше, так как в процессе измерений игла движется над поверхностью на высоте около 0,5 нанометра. В виду квадратичной зависимости туннельного тока от расстояния отклонение в 0,1 нанометра приводит к ошибке в 50% в измерении высоты рельефа. Такая же чувствительность к изменению высоты имеет место и в операции электрохимического осаждения.

Рассмотрим вопрос о том, какой вклад вносит изменение вектора действия силы тяжести в отклонение иглы.

Пусть отклонение иглы под действием силы тяжести равняется  $\kappa_B P$ , где  $P$  – сила тяжести,  $\kappa_B$  – коэффициент зависимости перемещения иглы от вертикальной составляющей силы тяжести.

При наклоне оси микроскопа в осях, жестко связанных с иглой, возникает горизонтальная составляющая силы тяжести. В результате перемещение иглы составит

$$\Delta = \kappa_\Gamma P \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  - угол наклона оси,  $\kappa_\Gamma$  - коэффициент зависимости перемещения иглы от горизонтальной составляющей силы тяжести.

С точностью до членов второго порядка малости

$$\Delta \approx \kappa_\Gamma P \alpha.$$

Заметим, что величина  $\kappa_\Gamma P$  равна перемещению иглы, если микроскоп положить на бок так, чтобы его ось располагалась горизонтально. В этом случае угол  $\alpha = 90^\circ$  и  $\sin \alpha = 1$ . Можно также мысленно предполагать, что сила тяжести действует на конструкцию микроскопа горизонтально.

Перейдем к расчету перемещений иглы, которые вызываются наклоном оси

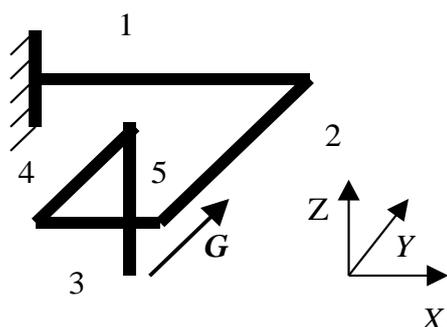


Рис. 3.

микроскопа. Сделаем это на примере конструкции микроскопа, разработанной в НАНОЦЕНТРе [2].

Расчет перемещения иглы вдоль оси  $OY$ . К перемещению конца иглы вдоль оси  $OY$  приводят:

1. прогиб балки 1 под действием веса балок 2, 3, 4 и узла крепления пьезодвигателя (5);
2. прогиб балки 2 под действием веса балок 3, 4 и узла 5;
3. кручение балки 1 под действием веса балок 3, 4 и узла 5;
4. прогиб балки 2 под действием веса узла 5;
5. прогиб и кручение балок 3, 4 под действием их веса и веса узла 5.

Наибольший вклад вносят факторы 1 – 3, так как балки 1 и 2 нагружены бол’ьшим весом и имеют бол’ьшую длину. Вклад факторов 4 и 5 примерно в 2 раза меньше. Оценим вклад каждого члена.

1. Балка 1 закреплена консольно. На ее конце располагается балка 2. Поэтому прогиб балки 1 [2] будет не менее

$$\frac{l^3 P}{3EJ},$$

где  $l$  – длина балки 1,  $P$  – вес балки 2,  $E$  – модуль упругости материала, из которого изготовлены балки,  $J$ – геометрический момент инерции сечения балки.

Подстановка конкретных значений:  $l = 5$  см;  $P = 15 \Gamma = 0,015$  кГ (брусек из алюминия сечением 1x1x5 см),  $E = 0,6 \cdot 10^6$  кГ / см<sup>2</sup>– модуль упругости алюминия,  $J = \frac{1}{12}$  см<sup>4</sup> дает 0,125 микрона.

2. Балка 2 нагружена постоянным моментом, который создается весом балок 3, 4 и узла 5.

Сдвиг вдоль оси  $OY$  произойдет поворота балки 3 на угол, который создаст прогиб балки 2. Угол поворота равен

$$\frac{lM}{EJ}.$$

Момент  $M$  создается весом звеньев 3 и 4 и, поэтому, равен  $\frac{lP}{2}$ .

В итоге сдвиг на длине балки 3 (половине длины балки 1) равен

$$\frac{l^3 P}{4EJ},$$

т.е. 0,1 микрона.

3. Перемещение конца иглы, вызванное кручением балки 1, равно произведению угла кручения на расстояние до балки  $h = 4$  см.

Угол кручения равен

$$\frac{M_{кр}}{GJ_o},$$

где

$M_{кр}$  – момент кручения, который равен произведению веса узла 5 ( $7,5 \Gamma = 0,0075 \text{ к}\Gamma$ ) и расстояния от центра масс узла 5 до плоскости манипулятора, равное 2,5 см. Таким образом,  $M_{кр} = 0,02 \text{ к}\Gamma \text{ см}$ .

$G$  – коэффициент упругости кручения, который приблизительно равен  $\frac{1}{3} E$ .

$J_o$  – геометрический момент сечения относительно оси балки.

$J_o \approx \frac{1}{10} d^4$ ,  $d$  – сторона квадратного сечения балки.

В результате эта компонента сдвига составит 0,2 микрона.

Суммарно факторы 1 – 3 дают сдвиг не менее 0,4 микрона. Учет факторов 4 и 5 увеличит эту оценку в 1,5 раза, т.е. до 0,6 микрона.

В результате оказывается, что конструкция блока манипуляторов имеет примерно одинаковую чувствительность, как к вертикальной, так и к горизонтальной составляющей силы тяжести.

*Расчет перемещения иглы вдоль оси OX.* Наибольший вклад в перемещения вдоль оси OX вносит изгиб балки 1 в результате чего образуется угол между балкой 2 и осью OY. Величина этого угла дается формулой

$$\frac{l^2 P}{2EJ}.$$

Перемещение иглы равно произведению угла на расстояние между осями иглы и балки 1, которое равняется  $\frac{l}{2}$ . В итоге перемещение равно  $\frac{l^3 P}{4EJ}$  или, с учетом значений величин, которые входят в формулу, 0,1 микрона.

Как отмечалось выше, пружинный подвес обеспечивает десятикратное уменьшение угла наклона оси микроскопа по сравнению с наклоном корпуса. Поэтому для того, чтобы обеспечить смещение иглы на 1 нанометр необходимо отклонить ось корпуса от вертикали на 1 градус.

*Расчет перемещения иглы вдоль оси OZ.* Рассмотрим теперь перемещение иглы в вертикальном направлении. Это перемещение происходит в силу кручения первой балки. Формула для вычисления перемещения конца иглы при кручении приведена выше. При вертикальном перемещении плечо поворота составляет половину длины балки (2,5 см), т.е. в 1,5 раза меньше, чем при вычислении смещения вдоль оси OY. В итоге он равен 0,15 микрон или 150 нанометров.

Эта оценка не учитывает кручение третьего звена и изгиб второго и четвертого звеньев. Расчеты показывают, что учет этих факторов увеличивает оценку вертикального перемещения до 200 нанометров. Заметим, что в процессе сканирования игла движется на высоте 0,5 нанометра, поэтому получившаяся величина вертикального отклонения иглы является достаточно большой.

Действительно, если отклонить ось измерительного блока микроскопа на 1 градус, то согласно полученной оценке игла отклонится от вертикали на 3 нанометра. Пружинный подвес уменьшает отклонение корпуса в десять раз, поэтому наклон корпуса на 1 градус приводит к перемещению иглы на 0,3 нанометра.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что возмущения в вертикальных движениях иглы является существенным при измерениях с субатомным разрешением, т.е. при таких измерениях, в результате которых оказываются видны атомы.

## **§ 2. Влияние статической неопределенности на точность движения иглы микроскопа**

Причинами возникновения наклонов корпуса микроскопа могут стать мягкость опоры и статическая неопределенность. Статическая неопределенность имеет место, если микроскоп опирается на лабораторный стол четырьмя опорами. Часто в качестве лабораторного стола используется обыкновенный учебный стол, изготовленный из ДСП. В этом случае не исключен прогиб крышки стола. Аналогичная ситуация имеет место если с целью снижения зависимости прибора от колебаний основания его устанавливают на мягкий коврик.

Оценки зависимости перемещений иглы от наклона оси микроскопа позволяют получить величину допустимых отклонений, которые не приводят к перемещению иглы более чем на 1 нанометр.

Выше было показано, что для этого достаточно, чтобы угол наклона основания не превышал приблизительно 1-го градуса.

Расстояние между опорами микроскопа равно 150 мм. Угол наклона основания микроскопа составит 1 градус, если каждая из ножек отклонится от исходного состояния более, чем на 1,5 мм. Из этого можно сделать вывод, что такое для микроскопа НАНОЦЕНТРА такое отклонение маловероятно.

Более вероятно изменение наклона крышки лабораторного стола вследствие ее деформации. Для создания получения угла в 1 градус достаточно нажать на крышку с силой, обеспечивающей ее прогиб в 10 мм, что, учитывая ширину стола в 50 см, совсем нетрудно сделать, облокотившись на него или положив толстую пачку книг.

Следует отметить, что все указанные причины носят характер случайных возмущений и могут быть исключены при внимательном проведении эксперимента.

В экспериментах по проверке зависимости положения иглы от угла наклона оси микроскопа угол наклона основания будет изменяться целенаправленно. Имеющиеся данные показывают, что для гарантированного выявления указанной зависимости потребуется задавать совсем небольшие наклоны основания – порядка нескольких градусов. Наклон на такие углы реализуются простейшими лабораторными

ми средствами. Поэтому эксперименты, основывающиеся на сравнении предсказанных величин отклонения иглы с измеренными, могут быть положены в основу проверки основных выводов излагаемой теории.

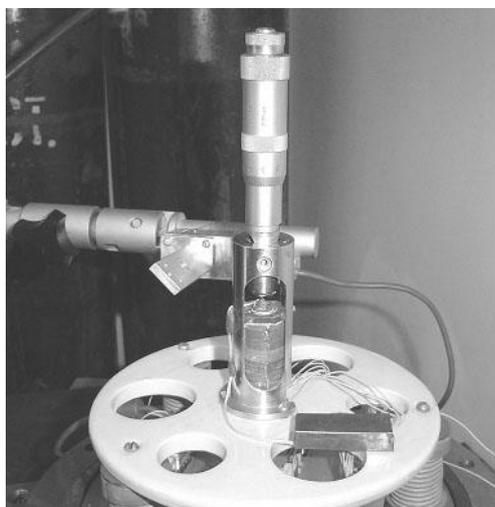
## **ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2**

В главе исследована зависимость перемещения иглы туннельного микроскопа НАНОЦЕНТРА от угла наклона его основания. Полученные оценки этой зависимости позволяют сделать следующие выводы.

1. Пружинный подвес микроскопа достаточно хорошо компенсирует наклон основания, так как угол наклона измерительного блока уменьшается на порядок. Вследствие этого оказывается возможным проводить измерения и технологические операции с точностью до десятых долей 1 нанометра.
2. Полученные оценки зависимости перемещения иглы от наклона оси микроскопа показывают, что точность установки основания, при которой отклонения иглы не превышают 1 нанометр, оказываются не критичными и легко выполнимы на практике.

## **Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАКЛОНА ОСНОВАНИЯ НА ПОЛОЖЕНИЕ ИГЛЫ ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА НПО АЛМАЗ**

В настоящее время туннельный микроскоп НПО АЛМАЗ находится в стадии наладки. Его конструкция существенно отличается от конструкции туннельного микроскопа НАНОЦЕНТРА. Этот микроскоп оснащен массивным корпусом и жестким упругим подвесом. Конструкция, которая несет пьезопривод, выполнена в виде цилиндра и не имеет балок. В результате, хотя для туннельного микроскопа НПО АЛМАЗ справедливы те же формулы, которые связывают колебания основания с наклоном измери-



тельного блока (они были выведены для туннельного микроскопа НАНОЦЕНТРА), константы в них отличаются на несколько порядков. Это обстоятельство является чрезвычайно интригующим при попытках переноса разработанной теории влияния возмущений на движение иглы.

Кроме того, при жестком подвесе проще проверить основные выводы теории, так как легче создать условия, при которых ось микроскопа отклонится от вертикали.

## § 1. Конструкция туннельного микроскопа НПО АЛМАЗ

Микроскоп конструкции НПО АЛМАЗ (рис. 5, 6) состоит из массивного основания (1), кожуха (2), упругого подвеса (3),

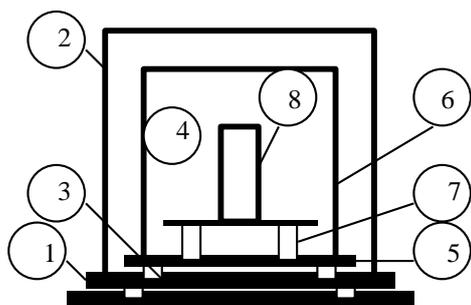


Рис. 5

представляет собой основание (1), с находящимся на нем микрометрическим механизмом (2).

В нижней части микрометрического механизма расположены:

пьезодвигатели грубых перемещений (3),

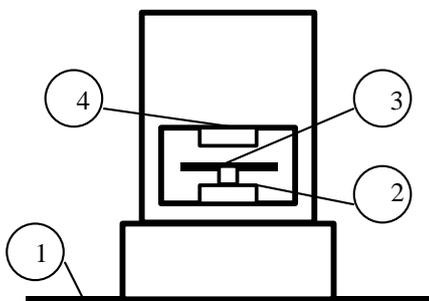


Рис. 6

камеры для проведения экспериментов (4), которая представляет собой массивное основание (5) и массивный кожух (6), упругого подвеса (7), туннельного микроскопа (8).

Туннельный микроскоп (рис. 5)

одной степени точного перемещения (4),

окно с площадкой для исследуемых образцов (5).

В верхней части находятся двигатель одной степени точного перемещения (6), к которому крепится игла микроскопа.

Опускание иглы перед началом работы осуществляется микрометрическим винтом, который располагается в рукоятке.

Основание кожуха имеет диаметр 30 см. Масса основания более 50 Н, масса кожуха – около 150 Н. Они выполнены из нержавеющей стали.

Резиновый подвес основания микроскопа состоит из трех опор, высотой 7 см и диаметром 5 см. Упругость каждой опоры 1 кГ/см.

Основание исследовательской камеры и его кожух также выполнены из нержавеющей стали. Основание имеет диаметр 20 см и массу 25 Н. Кожух камеры имеет массу 60 Н.

Упругий подвес микроскопа состоит из четырех металлических опор, каждая из которых имеет упругость 0,2 кГ/см.

Основание микроскопа выполнено из пластмассы толщиной 7 мм.

Основание микрометрического устройства имеет высоту 10 см, диаметр 4 см. Длина микрометрической рукоятки составляет 15 см. Диаметр – 3 см. Окно для установки образцов имеет высоту 8 см и ширину 3 см. Толщина стенок окна 1 мм, ширина – 2 см.

Масса микрометрического устройства с пьезодвигателями приблизительно равна 0,8 кг.

## **§ 2. Зависимость положения иглы от наклона основания микроскопа конструкции НПО АЛМАЗ**

Сравнительно жесткий упругий подвес приводит к тому, что наклон оси микроскопа практически равен наклону его основания. Такое свойство подвеса компенсируется жесткостью конструкции измерительной части, которая выполнена не в виде алюминиевых консольных балочек, а имеет замкнутую конструкцию из стали.

Тем не менее, расчеты зависимости перемещения иглы от угла наклона оси микроскопа показывают, что этот микроскоп также имеет высокую чувствительность к наклону оси.

Для того, чтобы найти величину этой зависимости, рассмотрим гипотетический случай когда микроскоп положен набок (рис. 7). Изгибающий момент в точке  $x$ , создаваемый весом микрометрической рукоятки  $P(0,8 \text{ кГ})$ , равен

$$(a+l-x)P.$$

Следовательно, деформация  $s$  в точке  $x$  равна  $\frac{(a+l-x)P}{EJ}$ .

Здесь

$E$ - модуль упругости (для стали  $E = 2 \cdot 10^6 \text{ кГ/см}^2$ ).

$J$  – геометрический момент сечения.

Поперечное сечение представляет собой две стенки (на рис. 7 одна стенка загроживает другую), каждая из которых имеет почти прямоугольное сечение толщиной

$b = 0,1 \text{ см}$  и высотой  $h = 3 \text{ см}$ . Поэтому  $J \approx$

$$2 \frac{h^3 b}{12} = \frac{h^3 b}{6} = 0,5 \text{ (см}^4\text{)}.$$

Угол поворота оси в точке с координатой  $x$  оси микроскопа под действием силы тяжести равен

$$\gamma(x)$$

$$= \int_0^x s(x) dx = \int_0^x \frac{(a+l-x)P}{EJ} dx = \frac{P}{EJ} \left( (a+l)x - \frac{x^2}{2} \right).$$

Отклонение оси микроскопа равно

$$c(x) = \int_0^x \gamma(x) dx = \frac{P}{EJ} \int_0^x \left( (a+l)x - \frac{x^2}{2} \right) dx = \frac{P}{EJ} \left( (a+l) \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right).$$

Из этих формул следует, что угол наклона оси в конце камеры для установки образцов составит

$$\gamma(l) = \frac{P}{EJ} \left( al + \frac{l^2}{2} \right) = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$$

Отклонение оси от вертикали окажется равным

$$c(l) = \frac{P}{EJ} \left( a \frac{l^2}{2} + \frac{l^3}{3} \right) \approx 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 3,5 \text{ микрона.}$$

На рис. 8 изображена форма, которую примет микроскоп под действием веса рукоятки, если его перевести в горизонтальное положение. Точка  $O$ , которая лежит на

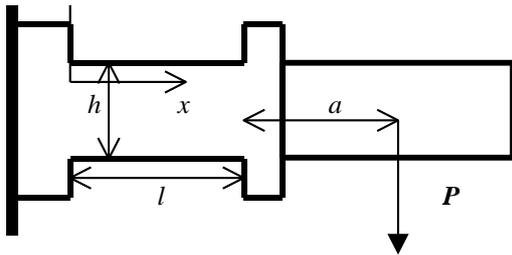


Рис. 7

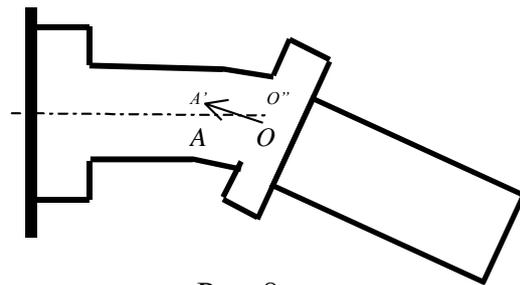


Рис. 8

оси микроскопа переместится в точку  $O'$  ( $OO' = c(l)$ ). Конец иглы (точка  $A$ ), который до наклона лежит на оси, переместится в точку  $A'$  ( $\angle OA'O' = \gamma(l)$ ).

Непосредственно из рис. 5 следует, что отклонение конца иглы от вертикали равно разности отклонения оси и смещения иглы, которое вызывается наклоном оси. Принимая во внимание, что от точки  $O$  до конца иглы (точка  $A$ ) расстояние равно 2 см, получим следующую оценку смещения конца иглы:

$$c(l) - 2 \text{ см } \gamma(l) = 1,9 \text{ микрона.}$$

Таким образом, коэффициент зависимости оказывается равным  $\frac{1,9 \text{ микр}}{1,5 \text{ рад}} = 1,3 \cdot 10^3$  нм/рад. Полученная оценка позволяет сделать вывод о том, что для того, чтобы смещение иглы относительно подложки составило 1 нанометр, достаточно наклонить ось измерительного блока на угол  $1/1300$  радиана, т.е. примерно  $0,05^\circ$ .

Высокая чувствительность микроскопа НПО АЛМАЗ к наклону оси требует достаточно точной установки основания, так как упругий подвес является сравнительно жестким и слабо демпфирует возмущения.

Микроскоп стоит на резиновом коврикe на 4 опорах, расстояние между которыми приблизительно равно 30 см. Для того, чтобы наклон оси основания не превосходил  $0,05^\circ$ , опоры должны быть выставлены таким образом, чтобы люфт в них, связанный со статической неопределенностью не превышал половине произведения расстояния между опорами, т.е. 0,1 мм.

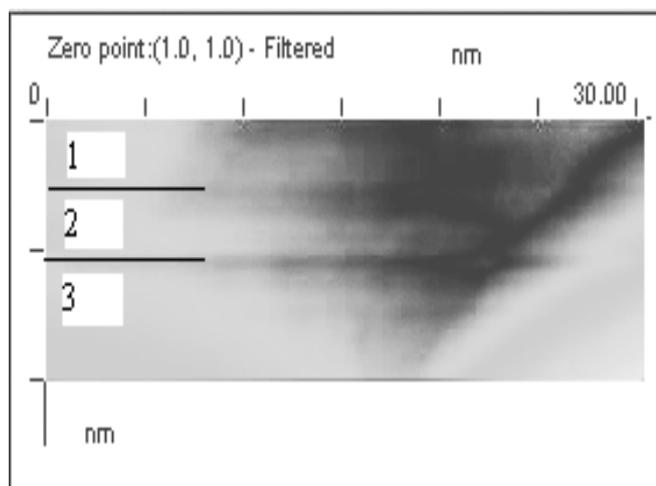
Для того, чтобы обеспечить заявленную точность измерений 0,1 нанометра наклон оси микроскопа не должен быть больше, чем  $0,01^\circ$ . Следовательно, прогибы резинового коврикa в точках опоры, возникающие в силу воздействий на микроскоп внешних возмущений, не должны превышать 0,01 мм.

### § 3. Экспериментальная проверка зависимости положения иглы от наклона оси измерительного блока

Проверка зависимости отклонений иглы от наклона оси измерительного блока осуществлялась путем сравнения изображений рельефа поверхности, снятых наклонах оси измерительного блока на известный угол. Наклон задавался путем установки гирьки на плоскость измерительного блока. Угол наклона измерялся по перемещению верхней точки корпуса микрометра. Микрометрический винт используется для подачи иглы до возникновения туннельного зазора. Эта процедура необходима для выведения иглы в рабочую зону пьезодвигателей вертикального перемещения.

После установки гирьки весом 20 Г вершина микрометрического винта сместилась на 0,25 мм. Высота измерительного блока 200 мм. Поэтому угол наклона составил  $0,12 \cdot 10^{-2}$  рад или 0,08 градуса.

На рис. 9 изображены изменения изображения при установке и снятии гирьки. Часть рисунка 1 (до тонкой черты) соответствует моменту времени до установки, часть 2 – после установки, часть 3 – после снятия. Наклон оси привел к смещению изображения на 2 нанометра. Учти-



ывая, что наклон оси составил  $0,12 \cdot 10^{-2}$  рад, коэффициент зависимости между смещением и углом оказывается равным  $1,6 \cdot 10^3$  нм/рад. Отметим хорошее соответствие между вычисленным и измеренным коэффициентом зависимости.

### ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

1. Туннельный микроскоп конструкции НПО АЛМАЗ имеет более высокую чувствительность к наклону оси основания, чем микроскоп конструкции НАНОЦЕНТРА.
2. Также как и в микроскопе конструкции НАНОЦЕНТРА чувствительность к наклону оси микроскопа связана с большой величиной деформации под действием силы тяжести конструктивных элементов, кото-

рые связывают узел крепления исследуемого образца с узлом крепления иглы.

3. Большая масса не гарантирует малую чувствительность микроскопа к наклону оси, так как в различных элементах конструкции не исключены эффекты, связанные со статической неопределенностью. К ним относятся:
  - а). Неплоскостность плиты, на которой стоит микроскоп
  - б). Наличие четырех точек опоры и симметричность конструкции микроскопа, в результате чего проекция центра тяжести оказывается вблизи центра опоры.
  - в). Неплоскостность тяжелого кожуха и то, что его центр масс близок к оси. В результате чего не требуется значительных усилий для того, чтобы наклонить его.
4. Проведенные эксперименты продемонстрировали хорошее согласие между предсказанной и измеренной величиной коэффициента зависимости.

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В работе выполнено аналитическое исследование зависимости перемещения иглы от наклона оси для туннельных микроскопов различных конструкций. Следует отметить, что в рассмотренных приборах технические решения, направленные на снижение влияния внешних механических возмущений различны и в некотором смысле диаметрально противоположны. Результаты выполненного исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Эксперименты подтвердили, что принятые модели достаточно хорошо объясняют наличие зависимости смещения иглы от наклона основания.
2. Целесообразно увеличивать жесткость конструкции, соединяющей площадку для исследовательских образцов и иглу. В обоих микроскопах зависимость положения иглы от наклона корпуса связана с недостаточной жесткостью измерительного блока.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.А.Карташев, Т.Ф.Бурухина. Исследование влияния нерезонансных периодических возмущений на положение иглы туннельного микроскопа. Препринт ИПМ РАН. М., ИПМ РАН, 2004.
2. V.Kartashev, A.Kotenkov, V.Kuzkin, M.Stepanov. Problems of Probe Tunnel Microscope Controlling. (В.Карташев, А.Котенков, В.Кузькин, М.Степанов. Задачи управления зондовым туннельным микроскопом). Труды международного совещания по микророботике, микромашинам и микросистемам, Moscow, М., IARP, 2003. с.с. 331-334.