ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. 2016. Т. LXIX, N3.

УДК 621.315

**НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

М.Г. АЗАРЯН

О ВЛИЯНИИ ГЕОМЕТРИИ ЗАЗОРА ЗОНД-ПОВЕРХНОСТЬ НА ИНФОРМАТИВНОСТЬ ТУННЕЛЬНО-ТОКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходя из геометрических параметров конфигурации туннельно-токовый твердотельный зонд вблизи исследуемой поверхности и зависимости протекающего через зонд тока от величины зазора между ними, получено аналитическое выражение, описывающее ток с этого зонда. На основе полученного выражения в графической программной среде созданы модель туннельно-токового зонда и виртуальный измерительный стенд. Проведенные на этом стенде исследования, подтверждая справедливость положений, лежащих в основе модели, продемонстрировали также и перспективность предлагаемого метода выделения информативной составляющей из сигнала с туннельно-токового зонда, работающего в жидкости с конечной проводимостью.

Ключевые слова: туннельно-токовый зонд, аналитическое выражение, модель, виртуальный стенд, метод выделения информативной составляющей.

Введение и постановка задачи. В зондовой микроскопии (ЗМ) информативный канал формируется природой взаимодействия исследуемой поверхности (ИП) с располагающейся вблизи нее поверхностью твердотельного кончика зонда. Ею же определяется и зависимость величины регистрируемого сигнала с зонда от зазора (h) между кончиком зонда и ИП. Это же обстоятельство обуславливает и необходимые масштабы (наноразмерные) диапазона рабочих зазоров в ЗМ.

Функционирование родоначальника класса ЗМ - сканирующего туннельного зондового микроскопа (СТМ) - обусловлено квантово-механической природой туннельного эффекта, выявляющего сильную (экспоненциальную) зависимость туннельного тока с зонда (J_{ft}) от зазора h между зондом и ИП [1].

Природа информативного канала наделяет туннельно-токовый зонд наивысшим латеральным разрешением, возможностью измерять, помимо прочего, и электрофизические параметры объектов. Вместе с тем использование СТМ требует наличия проводимости у исследуемых материалов.

Нередко естественной средой существования объектов исследований являются проводящие жидкости. Очевидно, что сложность СТМ-исследований таких объектов будет связана с шунтированием гальванической проводимостью туннельно-токовой составляющей регистрируемого тока – информативного канала туннельного микроскопа.

Можно попытаться с помощью некоторых подходов расширить область применения СТМ.

Одним из способов выделения в регистрируемом сигнале информативной составляющей может послужить реализация метода динамического конденсатора в микроскопе [2]. Метод предполагает стимулирование механического колебания зонда. Это приводит к формированию переменного туннельного тока за счет модуляции h. Тогда из-за разных законов зависимостей от h составляющих токов (для гальванического она значительно слабее экспоненциальной [3]) можно ожидать формирования в спектре сигнала с зонда соответствующих гармоник. В таком случае появляется возможность использовать гармонику (стимулированную туннельной составляющей тока) в качестве информативного канала.

Представляется перспективным:

- o исходя из условий и особенностей функционирования СТМ-зонда и используя геометрические параметры конфигурации зонд-поверхность и отмеченные закономерности для токов, попытаться получить аналитическое описание для сигнала с зонда;
- o создать на его базе (уже компьютерную) модель;
- o варьируя этими параметрами, отследить поведение информативного сигнала с модели зонда;
- o исследовать возможность реализации предлагаемой идеи выделения сигнала, информативного для СТМ-микроскопии;
- o решением этих задач параллельно осуществить наглядную демонстрацию основополагания роли описанных выше обстоятельств в осуществлении туннельного микроскопирования.

Расчетное обоснование. На рис. 1 приведено схематическое изображение конфигурации кончик твердотельного зонда вблизи ИП, разъясняющее положения, лежащие в основе модели.

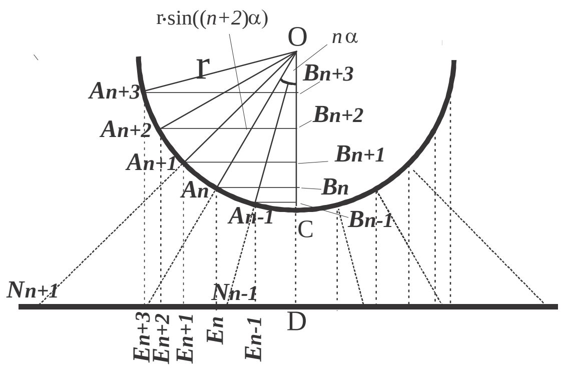

Рис. 1. Конфигурация зонд-поверхность

На ней основан вывод зависимости туннельного тока J_{ft} от величины зазора h и радиуса кривизны r зонда.

Из простых геометрических построений следует, что отрезок A_nB_n равен $OA_n \cdot sin(n\alpha)$, где α – единичный угол, а n - целое число. Поскольку отрезок CB_n равен приросту Δ к наикратчайшему расстоянию DC, то величина зазора h_n между каждой очередной n - й точкой (на приведенном схематическом рисунке точка на кривой сечения сферической поверхности) будет $h_n = h_{min} + \Delta_n$. Из рассмотрения треугольника A_nOB_n следует, что $\Delta_n = r - r \cdot cos(n\alpha)$, и, следовательно, можно записать

$$h_n = h_{min} + r[1 - cos(n \propto)].$$

Можно предположить, что туннельный ток J_t в системе зонд-ИП формируется, в первую очередь, из суммы “отдельных” плотностей туннельных токов вдоль параллельных друг к другу (и нормальных к ИП) треков h_n.

Следует отметить, что в развитие первой работы [4] здесь несколько изменены число и вид слагаемых треков для туннелирующих электронов, формирующих конечное значение туннельного тока с предлагаемой модели зонда, и она доработана с учетом ее работы с погружением в проводящую жидкость.

Для общности необходимо учесть и вклад возможных “косых” треков. В точку A_{n+1} сходятся треки $E_{n-1}A_{n+1}$, E_nA_{n+1}, $E_{n+1}A_{n+1}$, $E_{n+2}A_{n+1}$, $E_{n+3}A_{n+1}$ и $N_{n+1}A_{n+1}$.

Неучет большего числа подобных треков вполне оправдан из-за резкого (экспоненциального) спада плотности туннельного тока с ростом длины треков.

Длины учитываемых треков описываются следующими выражениями:

$$L_{E_{n+3}A_{n+1}} = \sqrt{(E_{n+1}A_{n+1})^2 + [(A_{n+3}B_{n+3}) - (A_{n+1}B_{n+1})]^2} =$$

$$= \sqrt{\{h_{min} + r[1 - cos[(n+1) \propto)]\}^2 + \{r\,sin[(n+3) \propto] - r\,sin[(n+1) \propto]\}^2}\,, \quad (1)$$

$$L_{E_{n+2}A_{n+1}} = \sqrt{(E_{n+1}A_{n+1})^2 + [(A_{n+2}B_{n+2}) - (A_{n+1}B_{n+1})]^2} =$$

$$= \sqrt{\{h_{min} + r[1 - cos[(n+1) \propto)]\}^2 + \{r\,sin[(n+2) \propto] - r\,sin[(n+1) \propto]\}^2}\,, \quad (2)$$

$$L_{E_{n+1}A_{n+1}} = DC + CB_{n+1} = h_{min} + r[1 - cos[(n+1) \propto)]\,, \quad (3)$$

$$L_{E_nA_{n+1}} = \sqrt{(E_{n+1}A_{n+1})^2 + [(A_{n+1}1) - (A_{n+1}B_{n+1})]^2} =$$

$$= \sqrt{\{h_{min} + r[1 - cos[(n+1) \propto)]\}^2 + \{r\,sin[(n+1) \propto] - r\,sin[(n+1) \propto]\}^2}\,, \quad (4)$$

$$L_{E_{n-1}A_{n+1}} = \sqrt{(E_{n+1}A_{n+1})^2 + [(A_{n+1}1) - (A_{n-1}B_{n-1})]^2} =$$

$$= \sqrt{\{h_{min} + r[1 - cos[(n+1) \propto)]\}^2 + \{r\,sin[(n+1) \propto] - r\,sin[(n-1) \propto]\}^2}\,, \quad (5)$$

$$L_{N_{n+1}A_{n+1}} = \frac{DDC + COCO}{cos(n+1)\propto)} - CO = \frac{h_{min} + r[1 - cos[(n+1)\propto)]}{cos(n+1)\propto)}. \quad (6)$$

Отметим, что в этой модели все туннельно-токовые треки “упираются” в точки аксиально-расположенных окружностей, совокупность которых формирует сферическую поверхность кончика зонда (на рис. 1 изображен радиус $A_{n+2}B_{n+2}$ одной из подобных окружностей).

Длина каждой очередной такой окружности может быть описана выражением

$$L_n = 2\pi r\, sin(n \propto). \qquad (7)$$

Для соответствующих плотностей трековых туннельных токов можно записать

$$J_{E_{n+3}A_{n+1}} = Ae^{-b\sqrt{\{h_{min}+r[1-cos[(n+1)\propto)]\}^2+\{r\,sin[(n+3)\propto]-r\,sin[(n+1)\propto]\}^2}},$$

$$J_{E_{n+2}A_{n+1}} = Ae^{-b\sqrt{\{h_{min}+r[1-cos[(n+1)\propto)]\}^2+\{r\,sin[(n+2)\propto]-r\,sin[(n+1)\propto]\}^2}},$$

$$J_{E_{n+1}A_{n+1}} = Ae^{-bh_{min}+r[1-cos[(n+1)\propto)]},$$

$$J_{E_nA_{n-1}} = Ae^{-b\sqrt{\{h_{min}+r[1-cos[(n+1)\propto)]\}^2+\{r\,sin[(n+1)\propto]-r\,sin[(n+1)\propto]\}^2}},$$

$$J_{E_{n-1}A_{n+1}} = Ae^{-b\sqrt{\{h_{min}+r[1-cos[(n+1)\propto)]\}^2+\{r\,sin[(n+1)\propto]-r\,sin[(n+1)\propto]\}^2}},$$

$$J_{N_{n+1}A_{n+1}} = Ae^{-b\frac{h_{min}+r[1-cos[(n+1)\propto)]}{cos(n+1)\propto)}}.$$

С учетом (7) для результирующего туннельного тока, составленного из проходящих через точки таковых окружностей плотностей трековых токов, можно записать

$$I_{tn}=2A\pi r\cdot sin\big((n+1)\propto\big)\cdot e^{-b\left[J_{E_{n+3}A_{n+1}}+J_{E_{n+2}A_{n+1}}+J_{E_{n+1}A_{n+1}}+J_{E_nA_{n-1}}+J_{E_{n-1}A_{n+1}}+J_{N_{n+1}A_{n+1}}\right]}.$$

Окончательное выражение для туннельного тока J_t (все треки, проходящие через поверхность зонда, образованную совокупностью из всех окружностей) будет иметь вид

$$I_t = Ae^{-bh_{min}} + \textstyle\sum_n I_{tn}. \qquad (8)$$

Представим себе, что туннельный зонд функционирует, будучи погружен в среду с конечным удельным сопротивлением (например, жидкость). В этой ситуации очевидно, что, помимо туннельного тока, через него будет протекать и ток проводимости I_G, который, как отмечено выше, будет шунтировать информативный туннельный ток. Можно предположить, что гальванический ток, “замыкающий” зонд с поверхностью, подчиняется закону Ома и складывается из плотностей такового тока вдоль каждой силовой линии электрического поля [5] между зондом и ИП:

$$J_{Gn} = \frac{V}{\rho l_n},$$

где V – напряжение между зондом и поверхностью; ρ – удельное сопротивление; l_n – длина силовой линии.

Можно заменить силовые линии прямолинейными NA-треками. Представляется, что такая замена незначительно нарушает картину процесса – “укорочение” пути из-за спрямления силовых линий особенно в рассматриваемых здесь масштабах столь мало, что вызываемым им изменением “сопротивления” (а значит, и значения плотности тока) можно пренебречь.

Таким образом,

$$J_{Gn+1} = \frac{Vs}{\rho L_{N_{n+1}A_{n+1}}}$$

и

$$I_G = \frac{Vs}{\rho h_{min}} + \frac{Vs}{\rho}\sum_n 2\pi r sin((n+1)\alpha)\frac{h_{min}+r[1-cos[(n+1)\propto)]}{cos((n+1)\propto)}\,. \qquad (9)$$

Присутствие первого слагаемого в (8) и (9) вызвано тем, что при суммировании (второе слагаемое) из-за специфики используемого аналитического выражения для треков “исключается” член с $((n+1)\alpha)=0$.

Очевидно, что сумма (8) с (9) определяет финальное значение выходного тока для выдвинутой модели зонда:

$$I_{fin} = I_t + I_G. \qquad (10)$$

Нас интересуют зависимости I_{fin} от r, n, ρ и h.

Полученный вид аналитического выражения позволил в программной среде LabVIEW создать компьютерную виртуальную модель, спроектировать программный испытательский стенд, в котором, помимо прочего, строились и наглядные графические отображения разнообразных зависимостей. В стенде предусмотрено также формирование модуляции зазора h_{min} (имитация колебания зонда) с последующим отображением спектра результирующего тока с такового зонда. Этот виртуальный измерительный стенд предоставляет возможность, рисуя одновременно кривые ходов каждого из слагаемых суммы, их различных комбинаций, наглядно регистрировать их влияние на итоговую зависимость. Такая “сервисность” помогла и в толковании получаемых результатов.

Обсуждение результатов

Функционирование в отсутствие шунтирующих токов. В качестве иллюстрации приведено семейство, сформированное зависимостями (8) постоянного тока $I_t(r_i(n\alpha))$, полученными при разных значениях r (рис. 2).

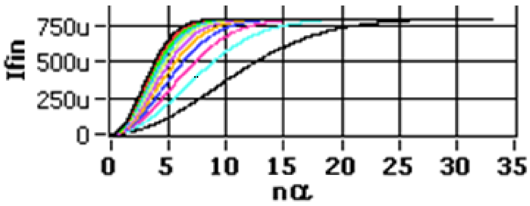

Рис. 2. Семейство зависимостей $I_t(r_i(na))$ с разными r

Диапазоном изменения Δα в $I_{fin}(na)$ определяется учитываемая поверхность для каждого из *i* зондов, а кривые $I_{fin}(na)$ отображают динамику роста тока. Наблюдаемое насыщение указывает на прекращение роста тока. Очевидно, что точка достижения насыщения определяет долю всей учитываемой поверхности зонда, которая "обеспечила" сбор всего тока. Видно, что по мере роста *r* эта поверхностная доля уменьшается, "концентрируясь" у кончика зонда. Все это свидетельствует о пространственной локализации "информативного канала" в этом модельном туннельном зонде.

Будучи хорошо известной в зондовой микроскопии, локализация поверхности сбора тока у кончика реального туннельного зонда, на наш взгляд, является аргументом правомерности выдвинутой модели.

Рассмотрим теперь результаты моделирования ее работы в режиме с модуляцией величины туннельного зазора.

Работа в присутствии шунтирующих токов. Здесь использовались как (10), так и в отдельности его составляющие (8) и (9). Именно такая возможность позволяет проследить за вкладом и влиянием слагаемых на полный ток с зонда.

На рис. 3 приведены сопоставления спектров слагаемых компонент $\tilde{I}_G(r_i(na))$ (рис.3а), $\tilde{I}_t(r_i(na))$ (рис.3б) и "прошунтированного" тока $\tilde{I}_{fin}(r_i(na))$ (рис.3в), полученных при возрастающих значениях удельного сопротивления, и значения их гармоник. Эти переменные токи формировались при задаваемом фиксированном значении величины зазора h_{min}.

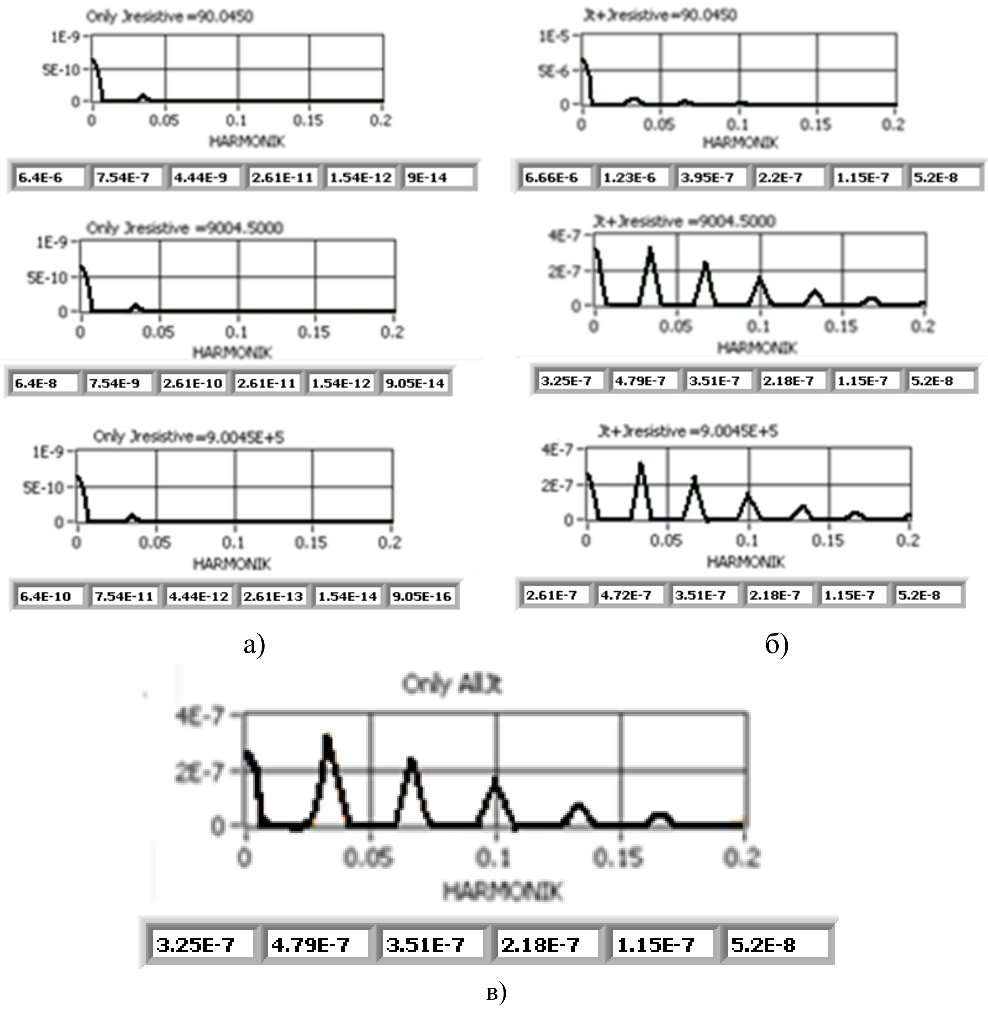

Рис. 3. Сопоставление спектров слагаемых:
колонка а - только шунтирующей составляющей тока; колонка б - только туннельной составляющей тока; в - всего тока

Как видим, в спектрах результирующих токов $\tilde{I}_{fin}(r_i(na))$ "проявившиеся" первая и высшие гармоники демонстрируют слабую зависимость от величины ρ. На спектрах же $\tilde{I}_G(r_i(na))$ величины этих же гармоник сильно зависят от ρ, а высшие гармоники имеют на порядки меньшие амплитуды.

Сопоставление спектров указывает на то, что в спектре $\tilde{I}_{fin}(r_i(na))$ высшие гармоники практически равны этим же гармоникам в спектре для туннельной составляющей $\tilde{I}_t(r_i(na))$. Легко заметить, что в спектре "зашунтированного" тока $\tilde{I}_{fin}(r_i(na))$ влияние изменения величины ρ сказывается только на значении первой гармоники.

В итоге можно констатировать, что в “зашунтированном” сигнале уже начиная с третьей гармоники влияние шунтирующей составляющей исчезает, и их амплитуды совпадают с амплитудами соответствующих гармоник информативной туннельной составляющей тока.

Таким образом, описанное подтверждает принципиальную справедливость высказанного выше способа выделения информативного канала.

Трансформация в семействах из немодулированных составляющих тока с зонда (подобных приведенным на рис. 2), но уже полученных для зонда, работающего в проводящей среде с разными значениями ρ (рис. 4), дополняет этот вывод.

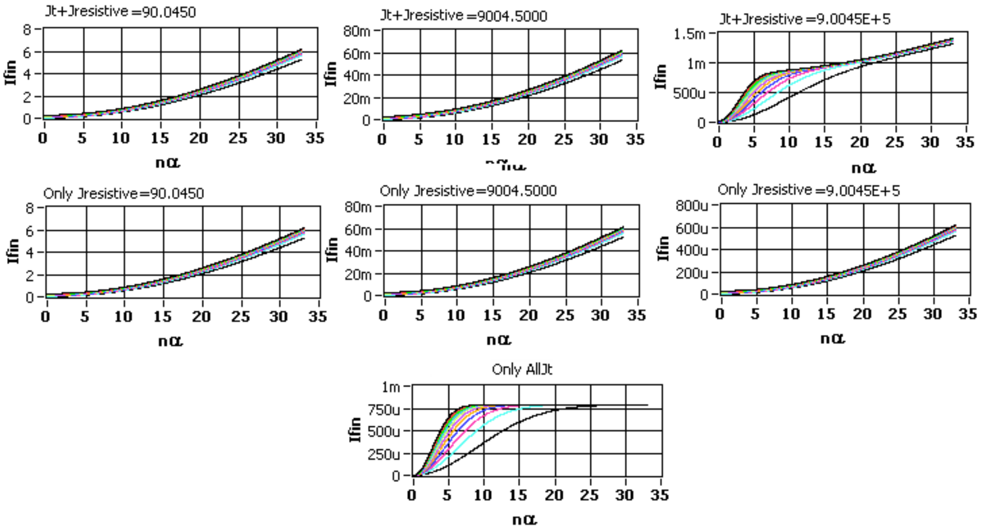

Рис. 4. Сопоставление семейств кривых $I_{fin}(r_i(n\alpha))$, демонстрирующее возрастание, по мере роста удельного сопротивления жидкой среды, роли туннельной составляющей в “итоговом” немодулированном токе

На кривых (рис. 4) хорошо заметен рост роли в спектре постоянного тока информативной составляющей – по мере роста удельного сопротивления жидкости вид семейства для полного тока уподобляется виду семейства для (не зависящего от ρ) туннельного тока.

Таким образом, полученные при моделировании зависимости подсказывают, что если туннельно-микроскопические исследования в штатном (нединамическом) режиме можно проводить *лишь* при соответствующем высоком значении $\rho_к$, то предлагаемый режим с модуляцией *может позволить* их проведение при значениях ρ почти на четыре порядка меньших $\rho_к$.

Выводы

Основываясь на приведенных результатах компьютерных испытаний виртуальной модели туннельно-токового зонда, можно констатировать, что:

- демонстрация характеристик, свойственных реальному ТМ-зонду, подтверждает справедливость выдвинутой модели;
- на основе этого вывода можно предположить, что идея с применением "модуляционного" режима работы на практике может быть использована для СТМ-исследований в жидких средах, имеющих конечную проводимость;
- модель наглядно демонстрирует, что "локализатором" информационного канала является крутизна закономерности спада величины сигнала взаимодействия зонда с ИП.

Автор выражает особую благодарность В.М. Арутюняну за проявленный интерес к работе и сделанные ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Быков В.А.** Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследования и модификации поверхностей: Дис. … д.т.н. - М., 2000.- 393 с.
2. Измерение контактной разности потенциалов методом динамического конденсатора / Составители: **Е.Н. Бормонтов**, **Т.Г. Меньшикова**, **Е.А. Тутов**: Учебно - методическое пособие для вузов. – Воронеж, 2006.- 19 с.
3. **Яворский Б.М., Детлаф А.А**. Справочник по физике. - М.: Наука, 1968. – 939 с.
4. **Azaryan M.H.** On the influence of the probe-surface configuration on descriptiveness of the tunneling-current studies// International Workshop on ionizing and non-ionizing radiation influence on structure and biophysical properties of living cells. - Tsaghkadzor, Armenia, September, 2015. - P. 25-27.
5. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники - М.: Высшая школа, 1978.- 528 с.

Ереванский государственный университет. Материал поступил в редакцию 16.02.2016.

Մ.Հ. ԱԶԱՐՅԱՆ

ԹՈՒՆԵԼԱՅԻՆ ՀՈՍԱՆՔՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԻՆՖՈՐՄԱՏԻՎՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ԹՈՒՆԵԼԱՅԻՆ ԶՈՆԴ-ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹ ԲԱՑԱԿԻ ԵՐԿՐԱՉԱՓԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԱԶԴՑՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Թունելային հոսանքի պինդմարմնային զոնդ-հետազոտվող մակերևույթ փոխդասավորվածության երկրաչափական պարամետրերի և զոնդ-մակերևույթ բացակի մեծությունից զոնդի հոսանքի կախվածության հիման վրա ստացվել է անալիտիկ արտահայտություն, որը նկարագրում է զոնդով հոսող հոսանքը: Գրաֆիկական ծրագրավորման միջավայրում այդ արտահայտության հիման վրա ստեղծվել են թունելային հոսանքի զոնդի մոդելը և վիրտուալ ստենդը: Վերջինով կատարված հետազոտությունները, հաստատելով մոդելի հիմքը կազմող դրույթների ճշմարտացիությունը, ցուցադրում են նաև առաջարկվող մեթոդի հեռանկարայնությունը՝ վերջավոր հաղորդականությամբ օժտված հեղուկում աշխատող թունելային զոնդից ստացված ազդանշանից ինֆորմատիվ բաղադրիչ անջատելու համար:

Առանցքային բառեր. թունելա-հոսանքային զոնդ, անալիտիկ արտահայտություն, մոդել, վիրտուալ ստենդ, ինֆորմատիվ բաղադրիչի բացահայտման մեթոդ:

M.H. AZARYAN

THE IMPACT OF THE GAP GEOMETRY PROBE–SURFACE ON THE INFORMATION DENSITY OF TUNNEL–CURRENT INVESTIGATIONS

The analytic relation, describing the current flowing through the probe is obtained from geometrical parameters of configuration of the tunnel-current solid-state probe close to the investigated surface, and from the surface- probe gap size dependence of the probe current. The model of the tunnel-current probe, as well as the virtual measuring test bench are realized using this relation in the graphic al programming environment. The studies conducted with the help of the measuring stand have confirmed the correctness of the concepts underling the model and demonstrated the prospect of the method for separating the information component from the tunnel-current probe signal operating in liquid with finite conductivity

Keywords: tunnel-current probe, analytic expression, model, virtual stand, method of separating the information component.