

УДК 62.91

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРО- И НАНОИЗМЕРЕНИЙ В ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ ГЕРМАНИИ

Г. Босе, Л. Кёндерс, Ф. Гертиг, Э. Бур, Г. Вилкенинг

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin,
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany
E-mail: Harald.Bosse@ptb.de*

Приведён обзор методов и приборов, разработанных и применяемых в Физико-техническом институте Германии для высокоточных размерных (линейных и угловых) измерений. Обсуждаются задачи, стоящие перед разработчиками в этой важной области метрологии.

Ключевые слова: размерная (линейная и угловая) метрология, микрометрология, нанометрология, моделирование сигналов.

Введение. Контроль размерных параметров в промышленном производстве различных систем и компонентов требует применения соответствующих средств измерений. При их выборе следует руководствоваться такими критериями, как быстрота, устойчивость, стоимость права собственности, возможность проведения трёхмерных (3D) измерений и контроля в процессе обработки, разрешение и повторяемость. В области микро- и нанотехнологий, как и при традиционном контроле производственного процесса, необходимо определять размерные характеристики и управлять ими на основе прослеживаемых (traceable) результатов измерения. При проведении линейных и угловых измерений с наименьшей погрешностью (неопределённостью) должны выполняться два основных требования: во-первых, использовать качественно спроектированную с высокими техническими характеристиками систему позиционирования, которая реализует перемещение измеряемого объекта с контролируемыми размерами относительно зондирующей системы измерительного прибора; во-вторых, иметь физическую модель взаимодействия измерительной системы с измеряемым фрагментом образца, на основе которой может быть проведён анализ результатов.

В данной работе рассматриваются примеры различных измерительных методов, а именно: тактильные, оптотактильные, а также пучковые (с использованием пучка частиц). Обсуждаются перспективы новых разработок в микро- и нанометрологии.

1. Микрометрология. Размеры измеряемых объектов для этой области метрологии обычно находятся в интервале от долей миллиметра до нескольких миллиметров, а требуемые неопределённости составляют 0,1 мкм и менее. За последнее десятилетие метрологическими институтами были начаты работы по созданию эталонных измерительных систем для размерной характеристики микрокомпонентов и микросистем, а также оптимизированных зондирующих систем для измерения малых объектов. Физико-технический институт (РТВ, Германия) внёс вклад в разработку как эталонной микрокоординатной измерительной машины [1], так и различных зондирующих систем для измерения геометрических параметров микрокомпонентов.

1.1. *Разработка микрозондов.* Оптотактильный датчик для двумерных (2D) измерений впервые был разработан в РТВ и передан в производство [2]. Он представляет собой волоконный шариковый зонд (щуп) диаметром менее 15 мкм (волокно используется для освещения). Положение зонда определяется с помощью ПЗС-камеры. После модернизации

эта система позволяет производить $3D$ -измерения на основе анализа спекл-картины волоконного шарика при освещении его когерентным источником света [3].

В сотрудничестве с Институтом микротехнологии при Техническом университете г. Брауншвейга (Германия) разработан и создан тактильный $3D$ -микродатчик. В этом устройстве с помощью встроенных пьезорезистивных датчиков измеряется деформация так называемой кремниевой босс-мембраны с контактным выступом [4]. Деформацию мембраны вызывают отклонения микрощупа, прикреплённого к её центральной части (выступу). Такой $3D$ -датчик позволяет измерять силы и смещения. Разработаны различные конфигурации щупов, отличающиеся диаметром шарика, длиной оси, типом выступа. В настоящее время в РТВ выполняется проект по реализации прослеживаемости измерений малых сил в диапазоне наноньютонов [5].

Ещё одна разработка в области зондов, применимых для характеристики микрокомпонентов, включает так называемый сборный кантилеверный щуп [6]. Три вышеописанные системы микрощупов, позволяющие определять размеры на доступной стороне микрокомпонентов, показаны на рис. 1.

Для измерений на участках, недоступных для тактильных датчиков или скрытых внутри измеряемых объектов, например включений, всё возрастающее применение находят методы рентгеновской компьютерной томографии (КТ). Вкладом РТВ в эту область метрологии являются разработки соответствующих стандартов, а также фундаментальные исследования по прослеживаемости результатов измерений методами КТ [7]. Эти работы будут продолжены для изучения возможности применения методов КТ в области микрометрологии.

2. Переходная область от микро- к нанометрологии. Следует отметить, что переход от микро- к нанометрологии — плавный. Так, существуют объекты с внешними размерами миллиметрового диапазона либо с наноразмерными деталями, подлежащими измерению, либо с очень малыми допусками на их размеры, которые необходимо определять с высокой точностью. Для решения этой проблемы в РТВ [8] был разработан измерительный широкодиапазонный зондовый микроскоп LR-SPM с рабочим полем $25 \times 25 \times 5$ мм, что позволяет использовать так называемую нанопозиционирующую и наноизмерительную машину NMM-1 [9] для прослеживаемых размерных измерений с разрешением 0,1 нм.

Программное обеспечение для контроля перемещения и оценки данных в этом приборе усовершенствовано путём объединения его с программным обеспечением Quindos координатно-измерительной машины. Это позволяет применять микроскоп LR-SPM для

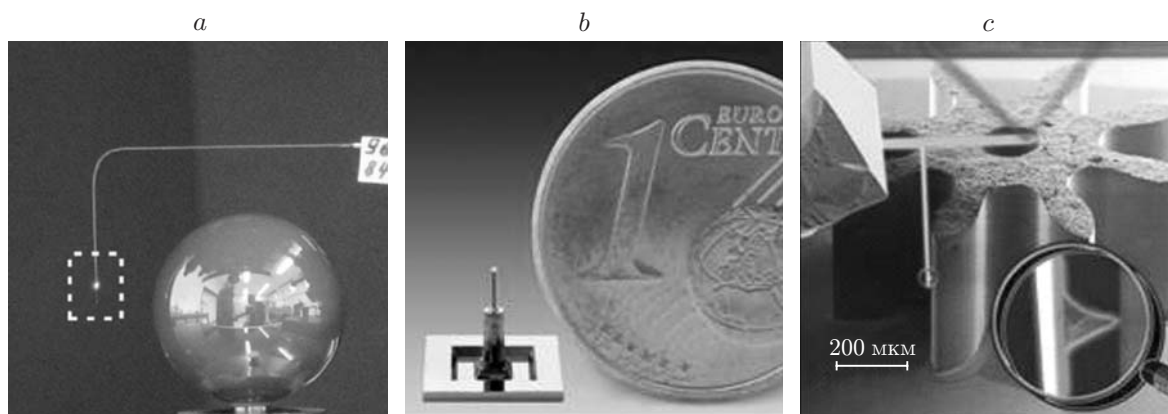


Рис. 1. Системы с микрощупом, разработанные и применяемые в РТВ для характеристики микрокомпонентов: *a* — оптотактильный $3D$ -щуп; *b* — $3D$ -микрощуп на кремниевой мембране с выступом; *c* — сборный кантилеверный щуп

высокоточной калибровки 3D эталонных объектов в микрокоординатной метрологии. Система двух сфер радиусом 1 мм на номинальном расстоянии 3 мм друг от друга показана на рис. 2, *a*. Пример повторяемости калибровок расстояния, полученных с помощью широкодиапазонного сканирующего зондового микроскопа LR-SPM при использовании щупа на кремниевой мембране с выступом [10] приведён на рис. 2, *b*. На рис. 2, *c* дано изображение микропирамиды с тестовыми структурами-маркёрами, полученное методом сканирующей электронной микроскопии с использованием сфокусированного ионного пучка. Данную структуру в форме микропирамиды можно калибровать с помощью таких устройств, как измерительный микроскоп LR-SPM, а затем применять в качестве калибровочного 3D-стандарта (рис. 2, *d*) для других типов сканирующих зондовых и электронных микроскопов [11].

3. Нанометрология. Эта область измерения связана с контролем объектов и процессов в нанометровом диапазоне, обычно (но не исключительно) при размерах менее 100 нм по одной—трём координатам. Такой контроль размерозависимых процессов на начальном этапе их формирования, как правило, открывает возможности новых применений [12]. Контроль процессов в нанометровом диапазоне требует разработки и применения соответствующих средств нанометрологии. Остановимся кратко на направлениях деятельности РТВ в области размерной нанометрологии.

Как уже было показано в разд. 2, сканирующая зондовая микроскопия играет важную роль в измерениях с высоким разрешением, а также при манипуляциях с наноструктурами и нанообъектами. Большой диапазон сканирования микроскопа LR-SPM также позволяет получить очень малую неопределённость измерений — всего несколько пикометров для среднего шага нанорешёток с площадью, больше обычной. Такие малые неопределённости могут быть достигнуты также путём применения оптических интегральных методов

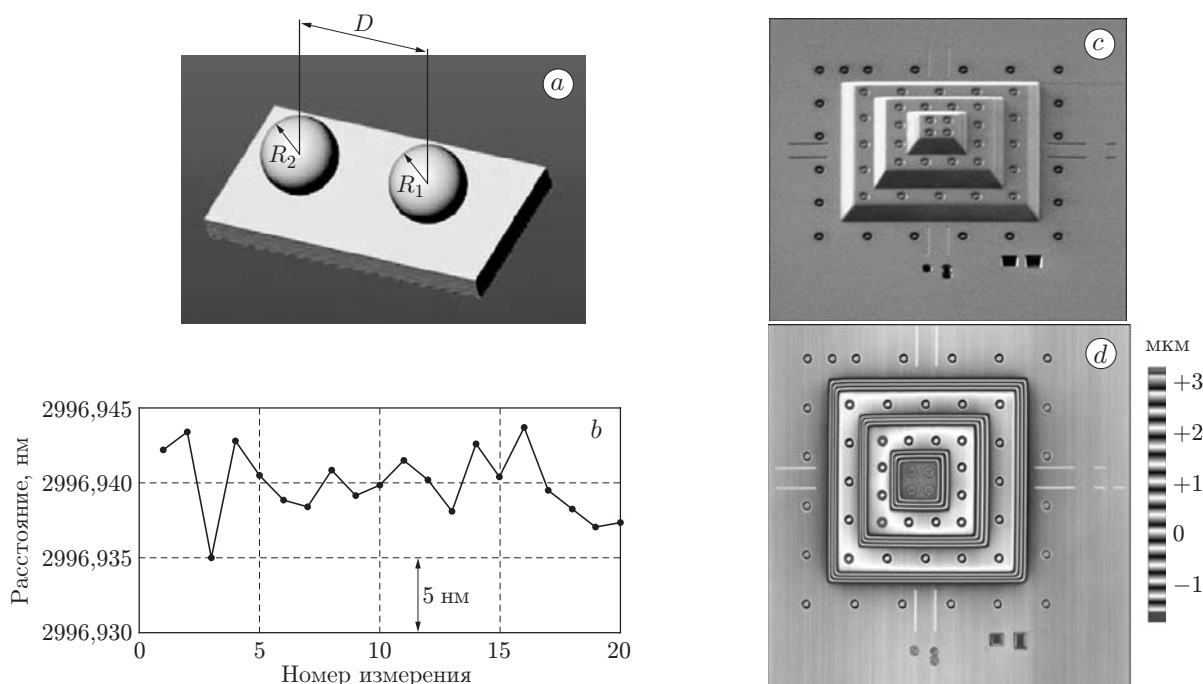


Рис. 2. Тестовый объект в виде двух малых сфер (*a*); график повторяемости результатов измерения расстояния (*b*); изображение микропирамиды, полученное с помощью сканирующих электронного и зондового микроскопов (диапазон сканирования 34 мкм), (*c*); микропирамида (вид сверху), используемая в качестве калибровочного образца для 3D-микроскопии, (*d*)

измерения, например дифрактометрических. Существенно, что микроскоп LR-SPM также даёт информацию о локальных отклонениях шага в образце.

3.1. *Оптические методы.* РТВ участвовал в международном сравнении $2D$ -решёток [13] с использованием дифрактометрической установки и микроскопа LR-SPM. Достигнутые с помощью этих приборов результаты измерений для двух стандартов сравнения с номинальными шагами 300 и 1000 нм находились в хорошем согласии с эталонными величинами. Стандартные неопределённости результатов, полученные в РТВ, например, для среднего шага 300 нм (по X -координате) для образцовой $2D$ -решётки составляли 12 и 5,6 пм при использовании дифрактометра и микроскопа LR-SPM соответственно. При международном сравнении оптических дифракционных измерений одномерных ($1D$) решёток, в котором принимало участие четыре национальных метрологических института, достигнуто хорошее совпадение результатов [14].

Оптическая дифракционная картина структур с решётками содержит информацию не только о среднем шаге, но и о других размерных особенностях, например высоте, межцентровом расстоянии на вершине (top CD — ширина линии) или у основания, а также об угле наклона боковой стенки. Чтобы извлечь информацию о таких структурах из оптической дифракционной картины, необходимо решить обратную задачу рассеяния. В этом случае требуется строгая модель взаимодействия света с $3D$ -структурой, для чего в РТВ используются максвелловские сольверы, основанные либо на методе строгого анализа связанных волн (RCWA), либо на методе конечных элементов (FEM) [15]. Для решения такой сложной математической задачи РТВ тесно сотрудничает с институтами прикладной математики [16]. Диапазон длин волн, в котором скатерометрия применяется в РТВ для характеристики нанорешёточных структур, простирается от видимой области до глубокого ультрафиолета (193 нм) и далее до жёсткого (электронного) ультрафиолета (13 нм). Последний диапазон длин волн доступен на Берлинских синхротронных накопителях BESSY II и на новом метрологическом источнике света MLS в РТВ [17]. Принцип действия нового скатерометра РТВ, работающего в области глубокого ультрафиолета, показан на рис. 3, *a*, его реализация — на рис. 3, *b*.

Для прослеживания калибровки ширины линии в РТВ используется также просвечивающая УФ-микроскопия и планируется применение микроскопа в проходящем свете на длине волны 193 нм, который сейчас находится в стадии разработки.

3.2. *Сканирующая электронная микроскопия.* Выше было подчёркнуто, насколько важно иметь подходящие физические модели измеряемых сигналов. Они являются необходимыми предпосылками для реализации прослеживаемых измерений и оценки неопределённости измерения при высокоточном размерном контроле. Аналогичная ситуация имеет место в «пучковой» метрологии, особенно в сканирующей электронной микроскопии,

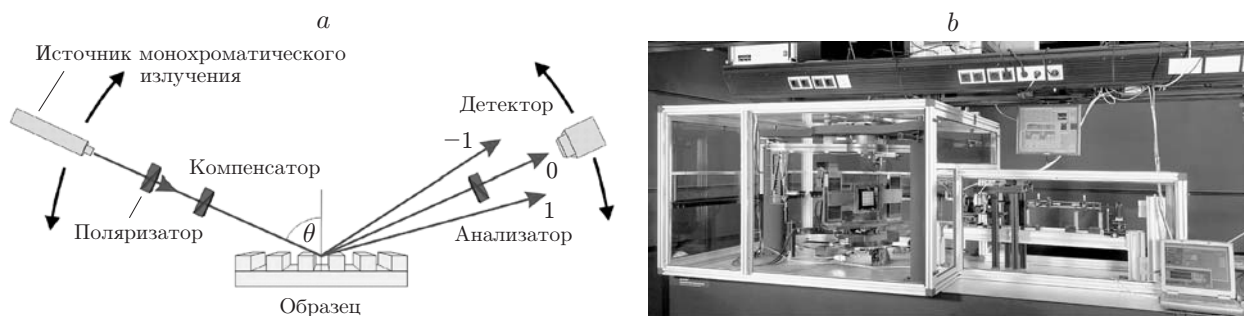


Рис. 3. Принцип действия нового скатерометра глубокого ультрафиолета РТВ для характеристики масочных структур (*a*) и его реализация (*b*)

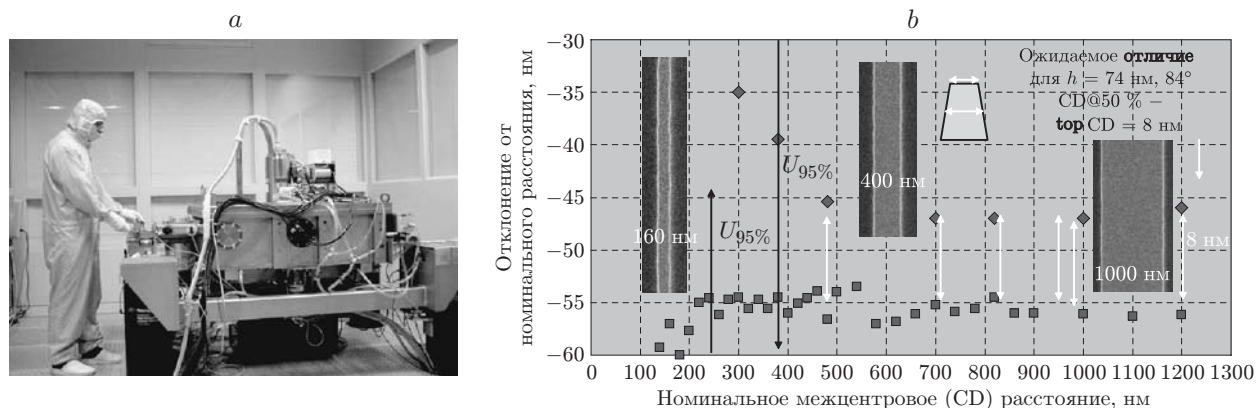


Рис. 4. Электронно-оптическая метрологическая система в чистом помещении РТВ (а); результаты калибровок межцентрового расстояния с помощью этой системы (верхнее межцентровое расстояние — ■) и просвечивающей УФ-микроскопии (на уровне 50 % от высоты структуры — ◆) (б)

несмотря на то что первичное пятно пучка микроскопа обеспечивает разрешение вплоть до 1 нм.

Однако первичные электроны инициируют последовательность упругих и неупругих актов рассеяния в твёрдом материале, что существенно снижает достижимое разрешение. Для моделирования таких событий и генерации вторичных и обратнорассеянных электронов, которые детектируются как сигнал при получении SEM-изображения, использовались программы моделирования на основе метода Монте-Карло [18]. На базе этих программ в РТВ разработаны специальные алгоритмы выделения краёв, применяемые для прослеживаемых измерений ширины линий с помощью SEM. Один из примеров — экспоненциальный подгоночный оператор для определения верхней ширины линии на основе характеристик диффузии электронов в твёрдом материале. Электронно-оптическая метрологическая система, которая применяется при SEM-измерениях для больших планарных объектов, показана на рис. 4, а. Результаты сравнительных измерений различных размерных характеристик хромовой маски на кварце с использованием просвечивающей УФ-микроскопии [19] приведены на рис. 4, б.

Другим примером использования SEM-моделирования является прослеживаемая характеристика размеров и формы частиц. (Эти исследования в РТВ находятся в стадии разработки.)

3.3. *Высокоточные измерения длин и топографии поверхностей.* Для прослеживаемости калибровок длин линейных и решёточных структур на подложках большего размера, вплоть до 600 мм (например, штриховых шкал или инкрементальных датчиков положения с неопределённостью всего в несколько нанометров) в РТВ применяется так называемый специальный вакуумный интерференционный нанометровый компаратор [20].

Это относится также и к описанию достижений РТВ в высокоточных угловых калибровках применительно к исследованию измерительных характеристик электронных автоколлиматоров. Такие маленькие угломерные устройства являются ключевыми компонентами дефлектометрических установок, используемых для высокоточного контроля плоскостности, а также в синхротронно-зеркальной метрологии [21].

Заключение. В свете достижений микро- и нанометрологии и будущих потребностей науки и промышленности нам представляются перспективными следующие направления работ:

— полностью прослеживаемые калибровки размеров для расширенного круга объектов;

— исследование и применение кристаллических структур (объёмный материал, поверхности, монослои, материалы на основе углерода);

— дальнейшее усовершенствование моделирования сигнала в целях уменьшения неопределённости измерений;

— разработка метрологических методик для микросистем с полными 3D-возможностями и неопределённостью всего несколько нанометров;

— 3D-характеризация наноструктур при измерениях геометрических параметров с субнанометровыми неопределённостями, а также других физико-химических величин.

Такое сочетание различных измерительных подходов по сути является новой тенденцией в развитии нанометрологии.

Авторы выражают благодарность коллегам из РТВ, а также из других организаций-участников проекта за их вклад в данную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Brand U., Kirchhoff J.** A micro-CMM with metrology frame for low uncertainty measurements // Meas. Sci. Technol. 2005. **16**, N 12. P. 2489–2497.
2. **Schwenke H., Weiskirch C., Kunzmann H.** Opto-taktiler Sensor zur 2D- und 3D-Messung kleiner Strukturen mit Koordinatenmessgeräten // Technisches Messen. 1999. **66**, N 12. S. 495–489.
3. **Neuschaefer-Rube U., Wissmann M.** Taktill-optischer 3D-Mikrotaster — Anordnungen und Messmethoden // PTB-Mitteilungen. 2007. **117**, H. 4. S. 390–396.
4. **Nesterov V., Brand U.** Modelling and investigation of the mechanical and electrical characteristics of the silicon 3D-boss microprobe for force and deflection measurements // Journ. Micromech. Microeng. 2006. **16**, N 7. P. 1116–1127.
5. **Nesterov V.** Facility and methods for the measurement of micro and nano forces in the range below 10^{-5} N with a resolution of 10^{-12} N (development concept) // Meas. Sci. Technol. 2007. **18**, N 2. P. 360–366.
6. **Dai G., Wolff H., Pohlenz F. et al.** Atomic force probe for sidewall scanning of nano- and microstructures // Appl. Phys. Lett. 2006. **88**, N 17. 171908.
7. **Bartscher M., Hilpert U., Goebels J., Weidemann G.** Enhancement and proof of accuracy of industrial computed tomography (CT) measurements // CIRP Annals. 2007. **56**, N 1. P. 495–498.
8. **Dai G., Jung L., Pohlenz F. et al.** Measurement of micro-roughness using a metrological large range scanning force microscope // Meas. Sci. Technol. 2004. **15**, N 10. P. 2039–2046.
9. **Manske E., Hausotte T., Mastlylo R.** New applications of the nanopositioning and nanomeasuring machine by using advanced tactile and non-tactile probes // Meas. Sci. Technol. 2007. **18**, N 2. P. 520–527.
10. **Dai G., Bütefisch S., Pohlenz F., Danzebrink H.-U.** A high precision micro/nano CMM using piezoresistive tactile probes // Meas. Sci. Technol. 2009. **20**, N 8. 084001.
11. **Ritter M., Dziomba T., Kranzmann A., Koenders L.** A landmark based 3D calibration strategy for SPM. Nanoscale metrology // Meas. Sci. Technol. 2007. **18**, N 2. P. 404–414.
12. **International Organization for Standardization** — International Standards for Business, Government and Society. URL: <http://www.iso.org> and subsequent links to the scope of ISO TC 229 on "Nanotechnology".

13. **Garnaes J., Dirscherl K.** NANO5 — 2D grating — Final report // Metrologia. 2008. **45**. Tech. Suppl. 04003.
14. **Decker J. E., Buhr E., Diener A. et al.** Report on an international comparison of one-dimensional (1D) grating pitch // Metrologia. 2009. **46**. Tech. Suppl. 04001.
15. **Bodermann B., Ehret G.** Comparison of different approaches for modelling microscope images on the basis of rigorous diffraction calculation // Proc. SPIE. 2005. **5858**. 09.
16. **Gross H., Model R., Bär M. et al.** Mathematical modelling of indirect measurements in scatterometry // Measurement. 2006. **39**, N 9. P. 782–794.
17. **Scholze F., Laubis C., Ulm G. et al.** Evaluation of EUV scatterometry for CD characterization of EUV masks using rigorous FEM-simulation // Proc. SPIE. 2008. **6921**. 69213R.
18. **Frase C. G., Häßler-Grohne W.** Use of Monte Carlo models in the development and validation of CD operators // Surf. Interface Anal. 2005. **37**, N 11. P. 942–950.
19. **Richter J., Heins T., Liebe R. et al.** Calibration of CD mask standards for the 65 nm node: CoG and MoSi // Proc. SPIE. 2007. **6533**. P. 6533–6553.
20. **Köning R., Flügge J., Bosse H.** Achievement of sub nanometer reproducibility in line scale measurements with the nanometer comparator // Proc. SPIE. 2007. **6518**. 65183F.
21. **Geckeler R. D.** Optimal use of pentaprisms in highly accurate deflectometric scanning // Meas. Sci. Technol. 2007. **18**, N 1. P. 115–125.

Поступила в редакцию 18 февраля 2010 г.
