

УДК 537.867:543

ПРИМЕНЕНИЕ КОАКСИАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УКРАЧИВАЮЩЕЙ ЕМКОСТЬЮ ДЛЯ ВЛАГОМЕТРИИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БИООБЪЕКТОВ

Полетаев Д. А.

*Физико-технический институт (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский
федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым
Научно-образовательный центр ноосферологии и устойчивого ноосферного развития
(структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
им. В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: poletaevda@cfuv.ru*

В работе рассматривается конструкция коаксиального резонаторного измерительного преобразователя с укорачивающей емкостью, предназначенного для определения влагосодержания в биологических объектах. На основании численной модели определены оптимальные геометрические размеры, проведен анализ основных характеристик малоразмерных биообъектов.

Ключевые слова: биологические объекты, СВЧ резонатор, резонаторный измерительный преобразователь, апертура, характеристики преобразования.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ближнеполевые СВЧ методы диагностики находят широкое применение в науке, технике и народном хозяйстве. Повсеместное использование аппаратуры, базирующейся на этих методах, обусловлено неразрушаемостью образца, отсутствием физического контакта, возможностью получения экспресс-данных при проведении исследований [1]. В наибольшей степени подобная аппаратура востребована в агропромышленных хозяйствах (измерители влажности), в различных областях науки и производства (микроволновая микроскопия), и в биологии (для исследования характеристик объектов) [1–3]. Неотъемлемой составляющей аппаратуры при использовании ближнеполевых СВЧ методов являются резонаторные измерительные преобразователи (РИП), конструкции и геометрия которых определяются областью использования. С учетом многообразия используемых сенсоров ниже рассматривается конструкция, которая нашла применение для исследований в биологии – РИП КИА (резонаторный измерительный преобразователь с коаксиальной измерительной апертурой).

Важной характеристикой жизнедеятельности биологических объектов и человека является наличие свободной воды в тканях и жидкостных средах [4]. Содержание свободной воды является объективным показателем состояния

жизнедеятельности организмов. Этот показатель является одной из наиболее тщательно поддерживаемых механизмами гомеостаза характеристик [4].

Определение влагосодержания СВЧ методами в биообъектах связано с рядом трудностей, в первую очередь, со сложностью решения задач СВЧ контроля малоразмерных объектов и обеспечением высокой чувствительности при высокой концентрации влаги. Кроме того, экспресс-контроль влагосодержания фактически требует внешнего, по отношению к датчику, расположения объекта и измерений в режиме реального масштаба времени.

Существует большое количество работ экспериментального и теоретического характера, посвященных исследованию применения резонаторных измерительных преобразователей для измерения влагосодержания в биообъектах [1, 3, 4]. Однако в этих работах не уделяется должного внимания оптимизации чувствительности датчика для осуществления многопараметрических исследований. Теоретическое обоснование выбора параметров РИП базируются на упрощенных моделях, позволяющих учитывать только колебательные потери в резонаторной системе. Современные прямые численные методы позволяют существенно уточнить модель РИП КИА, то есть учесть геометрию апертуры, расположение, размеры и другие характеристики исследуемого объекта и построить теоретические характеристики преобразования РИП КИА, связывающие информационные сигналы резонаторного измерительного преобразователя с электрофизическими параметрами исследуемого биообъекта [5].

Целью работы является выделение и анализ факторов, влияющих на чувствительность РИП КИА, применяемых для определения влагосодержания в биообъектах, построение характеристик преобразования и экспериментальная проверка результатов моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рис. 1 приведена конструкция рассматриваемого РИП КИА с прилегающим объектом.

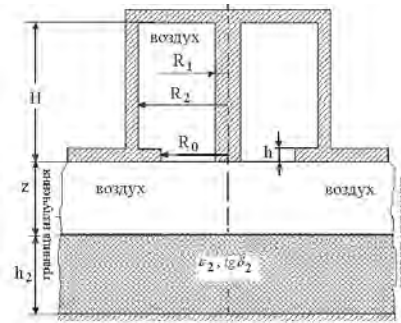


Рис. 1. Модель РИП КИА

Модель включает отрезок коаксиального волновода, образец толщиной h_2 с электрофизическими параметрами $\varepsilon_2, \text{tg}\delta_2$.

Для проведения практических измерений важно, чтобы электрофизические параметры образца оказывали как можно большее влияние на нагруженную добротность РИП. При этом нагруженная добротность не должна быть меньше 100 [6]. Из теории коаксиальных линий передач [7] известно, что минимальный коэффициент затухания в коаксиальной линии достигается при отношении радиусов: $R_1 / R_2 = 0,28$. Очевидно, максимальная добротность четвертьволнового резонатора будет также достигаться при данном отношении.

Максимум дисперсии для воды приходится на частоту около 10 ГГц [1]. Предварительный анализ позволяет выбрать геометрические размеры модели: $H / \lambda = 1,25$; $R_2 / \lambda = 0,17$; $h / H = 5,6 \cdot 10^{-3}$; $z = \infty$ (четвертьволновый резонатор нагружен на свободное пространство); проводимость стенок резонатора принята равной $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$ См/м (с целью учета влияния шероховатости стенок). Исследование влияния остальных геометрических размеров и параметров РИП и образца осуществлялось с помощью численной модели, в основе которой лежит метод конечных элементов, предусматривающий решение волновых уравнений с заданными краевыми условиями [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из общих физических представлений следует, что выбором радиуса R_0 апертуры можно существенно изменять добротность резонаторного измерительного преобразователя. На рис. 2 приведены зависимости добротности и резонансной частоты РИП от величины R_0 , рассчитанные при отсутствии объекта исследования.

Как видно из графиков на рис. 2, уменьшение R_0 апертуры снижает потери на излучение в свободное пространство. Необходимость учета излучательных потерь наиболее явно демонстрируется на зависимости добротности от R_0 апертуры (рис. 2а). Даже при малом размере R_0 добротность при учете излучения и без учета отличаются почти в 2 раза. Требуется отметить, что добротность РИП уменьшается в 1,5 раза, по сравнению с РИП, в котором выдержано оптимальное соотношение радиусов. Данное снижение добротности приходится считать вынужденным, при проектировании РИП для исследования влагосодержания в биообъектах малых размеров (например, зерен пыльцы). Из графика на рис. 2б видно, что учет излучения практически не влияет на резонансную частоту.

На рис. 3 приведены зависимости добротности и резонансной частоты РИП от продольного размера апертурно-формирующей части коаксиала h , при разных значениях величины R_0 .

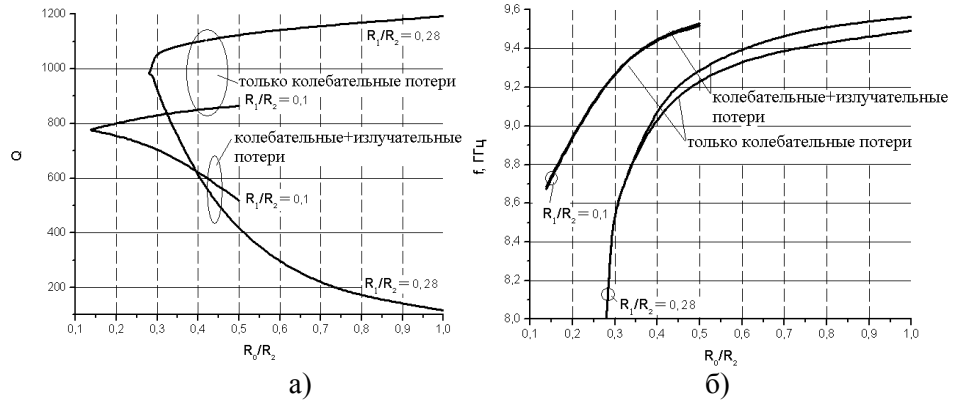


Рис. 2. Зависимость а) добротности и б) частоты от величины R_0

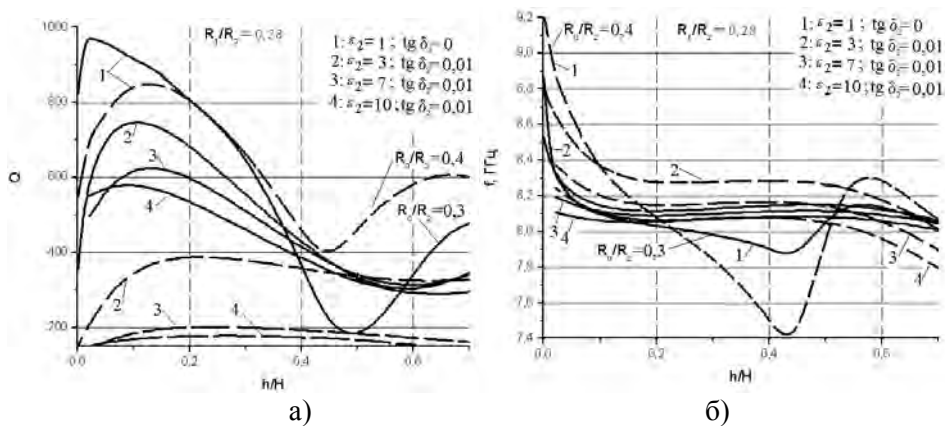


Рис. 3. Зависимость а) добротности, б) резонансной частоты от размеров апертуры

Характер изменения добротности (рис. 3а) носит резонансный характер. Более острый резонансный пик соответствует меньшему R_0 , что согласуется с общими физическими представлениями. Уменьшение резонансной частоты (рис. 3б) обуславливается ростом емкости апертуры, при увеличении ее продольного размера апертурно-формирующей части коаксиала.

Как видно из графика (рис. 3а) добротность РИП при исследовании образца с параметрами $\epsilon_2 = 3$; $\text{tg } \delta_2 = 0,01$ остается довольно высокой даже при раскрывах апертуры $R_0/R_2 > 0,3$. Отчетливо видно значительное изменение добротности с образцом, при $h/H \approx 0,4$ (что соответствует $h/\lambda = 0,5$), относительно добротности, рассчитанной при нагрузке на свободное пространство (рис. 3а). Данный факт согласуется с физическими представлениями и свидетельствует об адекватности численной модели. Вместе с тем, даже при $h/H \approx 0,4$, изменение добротности РИП в 2 раза меньше, чем при $h \rightarrow 0$. Это связано со значительным провисанием поля из

апертуры. Из графика на рис. 3, а следует весьма важный вывод: наибольшее изменение добротности обеспечивается при $h/H < 0,05$.

Влагосодержание в биообъектах характеризуется диапазоном изменения ε от 3 до 10 и $\operatorname{tg} \delta$ от 0,01 до 0,4 [1]. Таким образом, численные исследования целесообразно проводить в данном диапазоне изменения электрофизических параметров исследуемого образца.

Расчеты проведены для модели с параметрами: $H/\lambda = 1,25$; $R_2/\lambda = 0,17$; $z = 0$; $h_{21} = 0$; $h_2/\lambda = 0,14$; $h/H = 0,01$; проводимость стенок $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$ См/м; $\lambda = 3$ см, при изменении величины апертуры R_0/R_2 от 0,29 до 1, для образцов, параметры которых изменяются в указанных выше пределах. Графики зависимости добротности и чувствительности РИП от величины R_0 апертуры приведены на рис. 4. Чувствительность вычислялась исходя из изменения тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{dtg} \delta_2 = 0,01$, при значении $\operatorname{tg} \delta_2 = 0,01$ и постоянной относительной диэлектрической проницаемости.

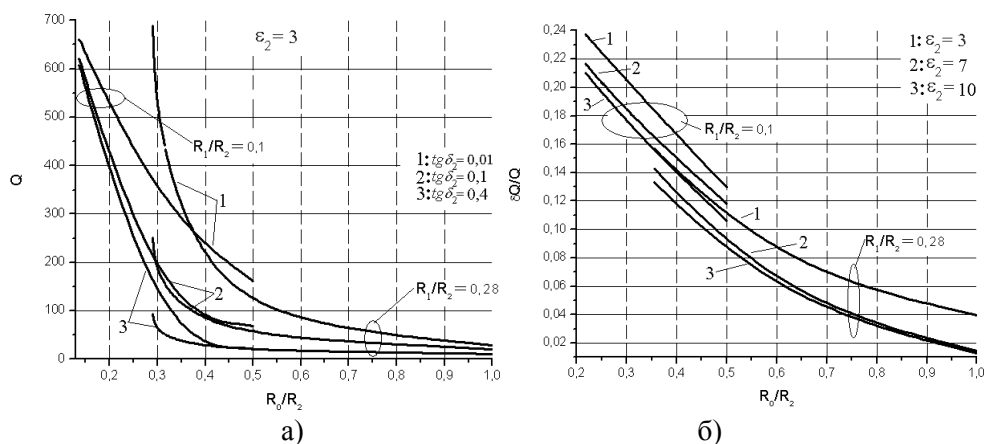


Рис. 4. Зависимость а) Q и б) $\delta Q/Q$ от величины апертуры и параметров образца.

Добротность РИП (рис. 4а) в большей степени зависит от величины апертуры, которая определяет величину излучательных потерь. Чувствительность датчика (рис. 4, б) увеличивается при уменьшении R_0/R_2 .

На рис. 5 представлены зависимости резонансной частоты и изменения резонансной частоты при вариации величины апертуры R_0/R_2 .

Как видно из графиков (рис. 4 и рис. 5), добротность при наличии объекта, удобная в метрологическом отношении [6], достигается в узком диапазоне значений R_0 . При этом чувствительность к образцам с высокой диэлектрической проницаемостью оказывается недостаточной. Поэтому оптимизировать такой резонаторный измерительный преобразователь следует отдельно для объектов с низким и высоким значением диэлектрической проницаемости.

Из графиков (рис. 6) видно, что большее значение относительной диэлектрической проницаемости образца увеличивает значение добротности системы, вследствие “запирания” энергии внутри резонатора.

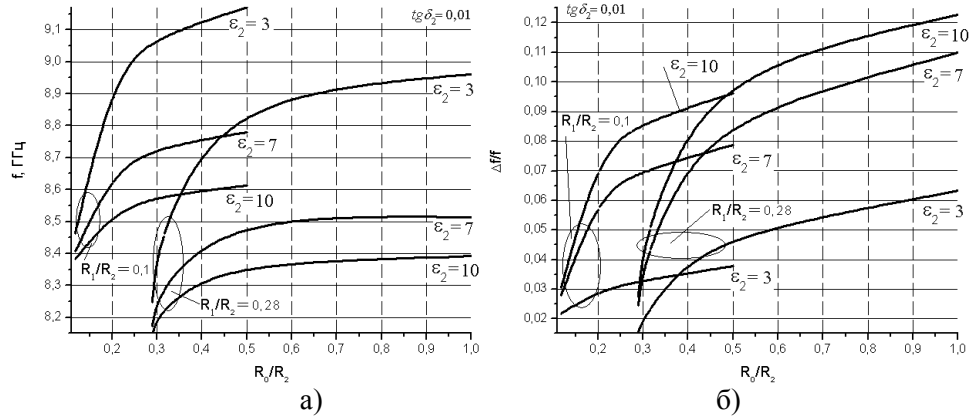


Рис. 5. Зависимость а) f и б) $\Delta f/f$ от величины апертуры и параметров образца

На рис. 6 и рис. 7 приведены рассчитанные характеристики преобразования РИП КИА с различными геометрическими размерами апертуры.

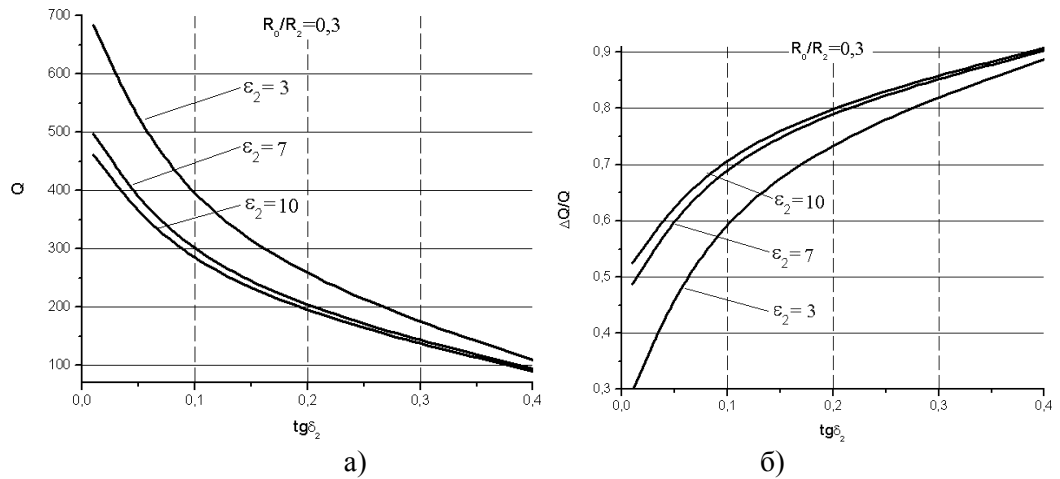


Рис. 6. Зависимость а) Q и б) $\Delta Q/Q$ от параметров образца

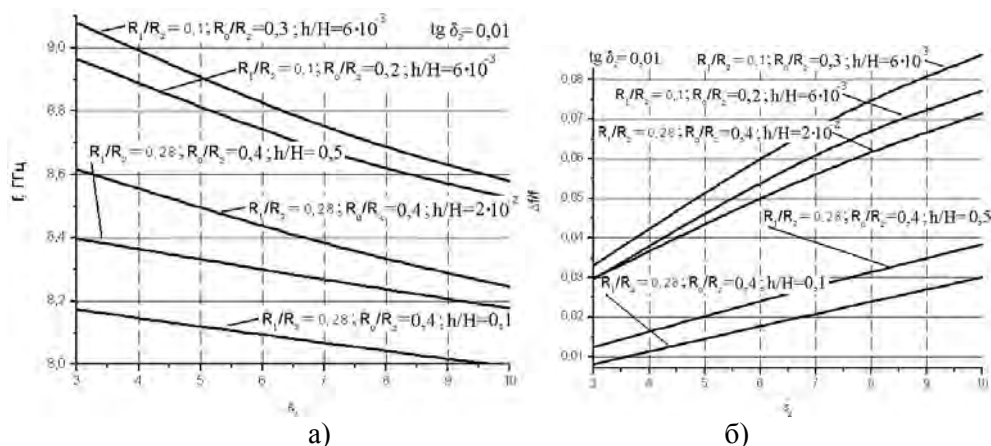


Рис. 7. Зависимость а) f и б) $\Delta f/f$ от параметров образца

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что при численном моделировании характеристик резонаторных измерительных преобразователей с коаксиальной апертурой необходимо учитывать потери на излучение.
2. Исследовано влияние величины воздушного зазора на информационные сигналы, построены характеристики преобразования РИП КИА.
3. Установлены количественные особенности влияния геометрии апертуры на добротность в широком диапазоне изменения электрофизических параметров малоразмерных биообъектов объектов.
4. Определены основные направления оптимизации чувствительности резонаторных измерительных преобразователей.

Статья подготовлена в рамках выполнения научного проекта в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности "Разработка информационно-методического обеспечения постоянно обновляемой диагностической модели устойчивого ноосферного развития Крымского региона", выполняемого Научно-образовательным центром ноосферологии и устойчивого ноосферного развития ФГАУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского (№ гос. регистрации: 115052150083).

Список литературы

1. Chen L. F. Microwave electronics measurement and materials characterization / L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo. – John Wiley & Sons Ltd, Southern Gate, 2004. – 537 p.
2. Лисовский В. В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов / В. В. Лисовский – УОБГАТУ, Минск, 2005. – 292 с.
3. Xu D. Measurement of the dielectric properties of biological substances using an improved open-ended coaxial line resonator method / D. Xu, L. Liu, Z. Jiang // Microwave theory and techniques. – 1987. – Vol. 35. – № 12. – P. 1424–1428.

4. Кузнецов А. Н. КВЧ диэлектрометрия биологических жидкостей в условиях нарушенного водного обмена / А. Н. Кузнецов, И. И. Турковский, И. А. Волкова // Биофизика. – 2001. – Т. 45, № 6. – С. 1122–1126.
5. Гордиенко Ю. Е. Вклад колебательных и излучательных потерь в характеристики СВЧ преобразователей с коаксиальной измерительной апертурой / Ю. Е. Гордиенко, Ю. И. Гуд, Д. А. Поletaев // Радиотехника. – 2009. – № 157. – С. 108–114.
6. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А.А. Брандт. – Изд-во физ.-мат. литературы, М., 1963. – 403 с.
7. Кураев А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Сеницын. – Из-во Бестпринт, Минск, 2004. – 358 с.
8. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ / А. Д. Григорьев. – Из-во Высш. шк., М., 1990. – 335 с.

USING A COAXIAL RESONATOR MEASURING CONVERTERS WITH SHORTENED CAPACITIES FOR MOISTURE METERING SMALL BIOOBJECTS

Poletaev D. A.

*Physics and Technology Institute of V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea
Research and Education Centre for Noospherology and Sustainable Development of V.I. Vernadsky
Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russia
E-mail: poletaevda@cfuv.ru*

Currently, near-field microwave diagnostic methods are widely used in science, technology. The widespread use of the equipment, based on these methods, due to the indestructibility of the sample, the lack of physical contact, the possibility of obtaining the express data in research. In most such equipment is demanded in agriculture (moisture meters), in various areas of science and industry (microwave microscopy) and in biology (for the study of the characteristics of the objects).

The aim of the work is to identify and analyze the factors influencing the sensitivity of the measuring converters that used to determine the moisture content in biological objects, building characteristics conversion, and experimental verification of the simulation results.

The calculations show that during the theoretical description of the characteristics of the resonator measuring converters with a coaxial aperture in the study of dielectrics with low losses is necessary to consider the radiation losses. Investigations of the influence of the air gap in the information signals, built conversion characteristics. Quantitative characteristics influence the geometry of the aperture on the quality factor in a wide range of electro-physical parameters of small biological objects objects, allowing to identify the main directions of optimization of the sensitivity of the resonator measuring transducers.

Keywords: biological object, microwave resonator, resonator measuring converter, aperture, conversion characteristics.

References

1. Chen L. F., Ong S. K., Neo S. R., *Microwave electronics measurement and materials characterization*, 537 p. ("John Wiley & Sons Ltd", Southern Gate, 2004).
2. Lisowski V. V., *Theory and practice of microwave moisture control of agricultural materials*, 292 p. ("UOBGATU", Minsk, 2005) (in Russ.).
3. Xu D., Liu L., Jiang Z., Measurement of the dielectric properties of biological substances using an improved open-ended coaxial line resonator method, *Microwave theory and techniques*, **35**, 12 (1987).
4. Kuznetsov A. N., Turka I. I., Volkova I. A., EHF dielectrometry biological fluids in a disturbed water metabolism, *Biophysics*, **45**, 6 (2001) (in Russ.).
5. Gordienko J. E., Good Y. I., Poletaev D. A., The contribution of the vibrational and radiative loss characteristics of microwave transmitters with coaxial measuring aperture, *Radio engineering*, **157**, 108 (2009) (in Russ.).
6. Brandt A. A., *Investigation of dielectrics at microwave frequencies*, 403 p. ("Sci. Literature, Moscow", 1963) (in Russ.).
7. Kuraev A. A., Popkov T. L., Sinitsyn A. K., *Electrodynamics and propagation*, 358 p. ("Bestprint", Minsk, 2004) (in Russ.).
8. Grigoriev A. D. *Electrodynamics and VHF*, 335 p. ("High School", Moscow, 1990) (in Russ.).