

УДК 681.335  
DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-1-121-125

## СПОСОБ ТОНОМЕТРИИ ГЛАЗА

© А.А. Лунгина, А.В. Курганский, Е.И. Глинкин  
Тамбовский государственный технический университет  
392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106  
E-mail: glinkinei@rambler.ru

Предложен способ тонометрии глаза по калибровочной амплитудно-временной характеристике, которая служит нормируемым эквивалентом и устраняет методическую и динамическую погрешность оценки внутриглазного давления.

*Ключевые слова:* способ тонометрии; постоянная времени; предельное напряжение; амплитудно-временные характеристики; методическая и динамическая погрешности

Предлагаемое изобретение относится к медицине, в частности, к измерению внутриглазного давления (ВГД), и может быть использовано для измерения офтальмотонуса в раннем посттравматическом периоде.

Известен способ измерения ВГД [1], основанный на получении реакции от глаза при воздействии на него механического вибратора. К глазу подводится устройство с вибрирующим зондом и фиксируется. На глаз оказывается давление с определенной силой устройством вместе с вибрирующим датчиком (зондом). Измеряется характер колебаний зонда, по которым судят о степени ВГД. Во время измерения ВГД положение устройства по отношению к глазу не меняют. Окончив измерение ВГД, устройство отводят от глаза.

Недостатками данного способа являются: низкая точность, связанная с влиянием на амплитуду колебаний плотности ретробульбарной клетчатки, влияющей на амплитуду колебаний всего глаза, соизмеримой с амплитудой колебаний зонда; значительная нагрузка на глаз тонометром (не менее 3–5 г), т. к. этот способ требует постоянного контакта тонометра с глазом; обязательная анестезия глаза, т. к. нагрузка в 3–5 г вызывает неприятные ощущения у больного; трудоемкость тонометрии.

Известен способ измерения ВГД [2], согласно которому приближают вибрирующий датчик к глазу до наступления контакта с ним и действуют на глаз до момента исчезновения сигнала на выходе вибрирующего датчика, отводят вибрирующий датчик от глаза и при этом измеряют максимальную амплитуду сигнала на выходе вибрирующего датчика, по значению которого судят об офтальмотонусе.

Недостатками данного способа являются: нестабильность во времени характеристик механического вибрирующего датчика; характеристики механического вибрирующего датчика в значительной мере подвержены влиянию окружающей среды, что приводит к изменению усилий в колебательной системе; амплитуда вынужденных акустических колебаний зависит от массы, механического сопротивления и других показателей, характеризующих общее состояние среды; мак-

симальное значение амплитуды будет на частоте механического резонанса; резонансные явления появляются при совпадении частот звуковых (ультразвуковых) колебаний с частотами мод колеблющихся оболочек клеток и составляющих цитоплазмы клеток, а также молекул и других элементов и структур.

Прототипом является способ [3], согласно которому приближают вибрирующий датчик к глазу до наступления контакта с ним и действуют на глаз до момента исчезновения сигнала на выходе вибрирующего датчика, отводят вибрирующий датчик от глаза и при этом измеряют максимальную амплитуду сигнала на выходе вибрирующего датчика, по значению которого судят об офтальмотонусе, вводят стабильную меру в виде костной ткани лобной части лица, для чего вначале приближают вибрирующий датчик к средней точке лобной части лица до наступления контакта с этой точкой и действуют на нее до момента исчезновения сигнала на выходе вибрирующего датчика, отводят вибрирующий датчик от средней точки лобной части лица и при этом измеряют максимальную амплитуду сигнала на выходе вибрирующего датчика, значение которой принимают за опорный сигнал, который сравнивают с измерительным сигналом.

Недостатками данного способа являются: низкая метрологическая эффективность из-за субъективного анализа максимального амплитудно-временного сигнала; асинхронность во времени между измерениями амплитуд измерительного и опорного сигналов; отсутствие нормируемого эквивалента, позволяющего интегрально судить об изменении амплитуды измерительного и опорного сигналов во времени.

Технической задачей способа является повышение метрологической эффективности, а именно точности тонометрии, за счет устранения методической и динамической погрешностей.

Техническая задача достигается тем, что в способе тонометрии глаза, в отличие от известных решений, нормируемым эквивалентом служит амплитудно-временная калибровочная характеристика с программно управляемыми предельными параметрами, для этого

последовательно измеряют две амплитуды исследуемого и опорного сигналов в два момента времени, по которым рассчитывают предельные параметры исследуемой и опорной характеристик: предельную амплитуду и постоянную времени, по которым аппроксимируют исследуемую и опорную характеристики, из разницы которых находят действительную характеристику, по которой судят об офтальмотонусе.

Сущность способа [4] поясняют рис. 1–4. Калибровочная амплитудно-временная характеристика (АВХ), полученная из аппроксимации исследуемой и опорной характеристик по двум амплитудам в два момента времени, представлена на рис. 1. На рис. 2 изображены исследуемая  $U_1$ , опорная  $U_2$  и действительная характеристики –  $\Delta U$ . Эталонная 1 и калибровочная 2 АВХ на рис. 3, а на рис. 4 приведена погрешность между ними, по которым рассчитывают предельные параметры исследуемой и опорной характеристик.

Способ тонометрии глаза включает 2 режима работы: 1) «измерение» и 2) «калибровка» (рис. 1).

1. Режим «измерение» предназначен для организации исследуемого и опорного сигналов при воздействии на глаз и лобную часть лица вибрирующим датчиком, который приближают к глазу и лобной части лица до наступления контакта с ними и действуют на глаз и лобную часть лица до момента исчезновения сигнала на выходе вибрирующего датчика, отводят вибрирующий датчик от глаза и лобной части лица, костная ткань которой служит нормируемой мерой (рис. 1).

2. Режим «калибровка» предназначен для ввода нормируемого эквивалента, которым служит калибровочная амплитудно-временная характеристика  $U_i$  (рис. 1) с программно управляемыми предельными параметрами. Для этого последовательно измеряют две амплитуды исследуемого  $U_1$  и опорного  $U_2$  сигналов в два момента времени  $t_1$  и  $t_2$  (рис. 1), по которым рассчитывают предельные параметры исследуемой  $U_1$  и опорной  $U_2$  (рис. 2) характеристик: предельную амплитуду  $U_0$  и постоянную  $T_0$  времени. По ним аппроксимируют исследуемую  $U_1$  и опорную  $U_2$  характеристики, из разницы которых находят действительную  $\Delta U$  характеристику, по которой судят об офтальмотонусе.

Далее определяют предельные параметры калибровочной амплитудно-временной характеристики (АВХ).

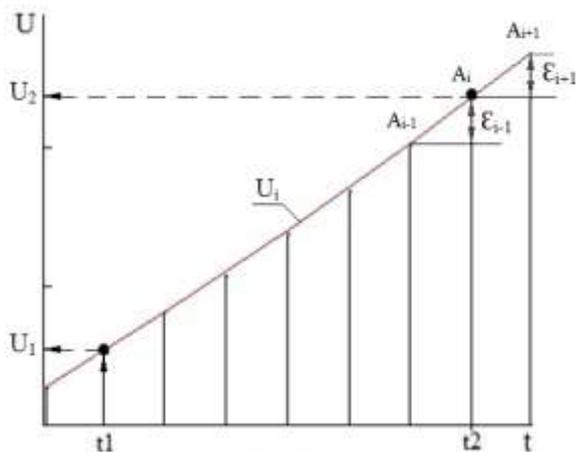


Рис. 1. Исследуемая амплитудно-временная характеристика

Математическая модель АВХ выбрана в экспоненциальной форме  $F_0(\Phi) = U(t, U_0, T_0)$ :

$$U = U_0(e^{\frac{t}{T_0}} - 1), \tag{1}$$

где  $U_0$  и  $T_0$  – предельные параметры АВХ: предельное напряжение и постоянная времени.

Определяют параметры АВХ, решая систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} U_1 = U_0(e^{\frac{t_1}{T_0}} - 1) \\ U_2 = U_0(e^{\frac{t_2}{T_0}} - 1), \end{cases} \tag{2}$$

где  $U_1$  – амплитуда сигнала в момент времени  $t_1$ ;  $U_2$  – амплитуда сигнала в момент времени  $t_2$ .

Параметр  $U_0$  рассчитывают из инверсной (2) системы уравнений модели

$$\begin{cases} t_1 = T_0 \ln(U_1/U_0 + 1) \\ t_2 = T_0 \ln(U_2/U_0 + 1). \end{cases} \tag{3}$$

Поделим второе уравнение системы (3) на первое, и с учетом соотношения моментов времени  $t_2 = n \cdot t_1$ , из логарифмического уравнения

$$n \cdot \ln(U_1/U_0 + 1) = \ln(U_2/U_0 + 1),$$

после экспоненцирования, запишем степенное уравнение

$$(U_1/U_0 + 1)^n = (U_2/U_0 + 1),$$

где  $n = t_2/t_1$ .

Разложим левую часть равенства по формуле бинома Ньютона:

$$(U_1/U_0 + 1)^n \approx 1 + n \cdot U_1/U_0 + \frac{n \cdot (n-1)}{2} \cdot (U_1/U_0)^2,$$

отсюда приведем к квадратному уравнению

$$1 + n \cdot U_1/U_0 + \frac{n \cdot (n-1)}{2} \cdot (U_1/U_0)^2 = U_2/U_0 + 1.$$

После сокращения единиц и понижения степени на  $U_0$  находим предельное напряжение

$$U_0 = \frac{n(n-1)U_1}{2(U_2/U_1 - n)}. \tag{4}$$

Из первого уравнения системы (3) определяем алгоритм оптимизации постоянной времени

$$T_0 = \frac{t_1}{\ln(U_1/U_0 + 1)}. \quad (5)$$

По найденным предельным параметрам восстанавливают исследуемую характеристику  $U_i$  в экспоненциальной форме по формуле (1) (рис. 1). Таким же образом восстанавливают опорную характеристику, затем получают следующую систему

$$\begin{cases} U_1 = U_{01}(e^{\frac{t_1}{T_{01}}} - 1) \\ U_2 = U_{02}(e^{\frac{t_2}{T_{02}}} - 1). \end{cases} \quad (6)$$

Из разницы исследуемой и опорной характеристик соответственно получают калибровочную характеристику  $\Delta U$ , по которой судят об офтальмотонусе (7) (рис. 2).

$$\Delta U = U_1 - U_2. \quad (7)$$

Определяем калибровочную характеристику  $\Delta U_0$  здорового человека. Судить об офтальмотонусе любого

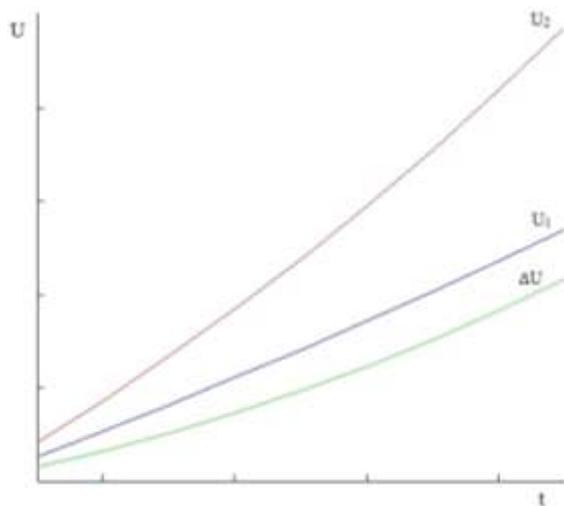


Рис. 2. АВХ:  $U_1$  – исследуемая,  $U_2$  – опорная,  $\Delta U$  – калибровочная

пациента можно, сравнивая полученную  $\Delta U$  для него характеристику с нормированной  $\Delta U_0$  характеристикой.

$$\Delta U_i \begin{cases} = \\ > \\ < \end{cases} \Delta U_0, \text{ то } F = \begin{cases} 1, \text{ здоров} \\ +0, \text{ давление повышено} \\ -0, \text{ давление понижено} \end{cases} \quad (8)$$

По алгоритму возможны три случая: 1) если  $\Delta U_i = \Delta U_0$ , то пациент здоров; 2) если  $\Delta U_i > \Delta U_0$ , то у пациента ВГД повышено; 3) если  $\Delta U_i < \Delta U_0$ , то у пациента ВГД понижено (8).

Докажем эффективность предлагаемого способа тонометрии глаза.

Эффективность предлагаемого способа достигается в результате введения нормируемого эквивалента, которым служит калибровочная амплитудно-временная характеристика с программно управляемыми предельными параметрами.

1. Снижение методической погрешности и работоспособность метода доказываются тождественностью предельных параметров  $U_0$  и  $T_0$  амплитудно-временной характеристики, определяемых по любым  $ij$ -м сочетаниям двух амплитуд  $U_{ij}$  измеренных сигналов в два момента времени с периодом 0,1 с. Полученные в результате эксперимента данные для каждого момента времени приведены в табл. 1.

$U_i$  – амплитуды исследуемого сигнала;  $U_{0i}$  и  $T_{0i}$  – предельные параметры исследуемой и опорной характеристик;  $\varepsilon_{U_{0i}}$  и  $\varepsilon_{T_{0i}}$  – погрешности определения предельных параметров калибровочной характеристики;  $\varepsilon_F$  – погрешность между экспериментальной и калибровочной функциями моделирования.

Из табл. 1 видно, что при увеличении амплитуд  $U_i$  сигнала в десять раз (с 2,66 до 26,95) тождественность предельных параметров  $U_{0i}$  и  $T_{0i}$  с погрешностью  $\varepsilon_{U_{0i}} \sim \varepsilon_{T_{0i}} < 0,2\%$ . При этом методическая погрешность  $\varepsilon_F$  между экспериментальной 2 и калибровочной 1 функциями (рис. 3) не превышает  $2 \cdot 10^{-14}\%$  (рис. 4).

2. Снижение динамической погрешности определяется сравнением погрешностей предельных параметров  $\varepsilon_{U_{0i}} \sim \varepsilon_{T_{0i}}$  предлагаемого способа и способа прототипа  $\varepsilon_{+-}$  изменения максимальной амплитуды.

$$\eta_{+-} = \frac{\varepsilon_{+-}}{\varepsilon_{U_0}}. \quad (9)$$

Таблица 1

Тождественность предельных параметров

$i$	$t, \text{ с}$	$U_i$	$U_{0i}$	$T_{0i}$	$\varepsilon_{U_{0i}}, \%$	$\varepsilon_{T_{0i}}$	$\varepsilon_F, \times 10^{-12}, \%$	Пара $I-j$
1	0,1	2,661	90,765	34,606	0,196	0,193	0,003	1–8
2	0,2	5,4	90,893	34,655	0,054	0,053	0,002	2–8
3	0,3	8,219	90,956	34,678	0,014	0,014	0,001	3–8
4	0,4	11,121	90,909	34,661	0,038	0,036	0,001	4–8
5	0,5	14,107	90,844	34,638	0,109	0,102	0,001	5–8
6	0,6	17,181	90,943	34,673	0,001	0,001	0,002	6–2
7	0,7	20,345	90,924	34,666	0,021	0,020	0,001	7–2
8	0,8	23,601	90,893	34,655	0,054	0,053	0,001	8–2
9	0,9	26,953	90,851	34,639	0,101	0,098	0,001	9–2

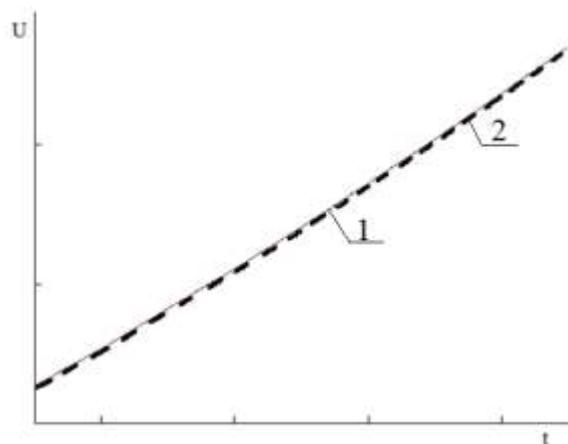


Рис. 3. Тожественность эксперименту: 1 – калибровочной; 2 – АВХ

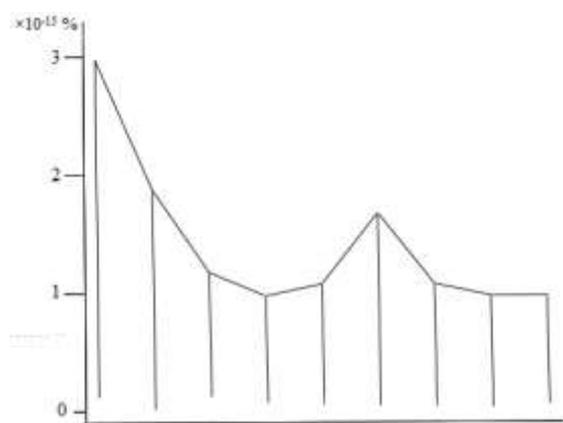


Рис. 4. Методическая погрешность

Динамическая погрешность измерения максимальной амплитуды определяется как соотношение амплитуд  $A_{i-1}$  и  $A_{i+1}$  к  $A_i$  (рис. 1)

$$\varepsilon_i = \frac{A_i - A_{i\pm 1}}{A_i} \quad (10)$$

В результате эксперимента установлено, что  $\varepsilon_+ = 12,79\%$  и  $\varepsilon_- = 12,44\%$ .

Динамическая погрешность определения предельных параметров амплитудно-временной характеристики не превышает  $-0,196\%$ .

$$\eta_+ = \frac{\varepsilon_+}{\varepsilon_{a01}} = \frac{12,79}{0,196} \approx 65,26,$$

следовательно, эффективность по точности увеличилась на два порядка.

Таким образом, введение калибровочной амплитудно-временной характеристики, которая служит нормируемым эквивалентом, в отличие от известных решений устраняет методическую и уменьшает на два порядка динамическую погрешности измерения. Это приводит к повышению точности измерения внутри-

глазного давления, что в свою очередь позволяет поставить более точный диагноз заболевания и провести соответствующее лечение.

#### ОТВЕТ

на запрос патентной экспертизы от 03.12.2015 г.  
по заявке № 2015111776/14

Ознакомившись с запросом патентной экспертизы, авторы согласны с убедительными доводами эксперта и предлагают скорректировать формулу, исключив признак «**программно управляемыми**» с определением нормируемого эквивалента как «амплитудно-временная калибровочная характеристика с предельными параметрами». При этом отличительный признак формулы изобретения скорректировать как «...что нормируемым эквивалентом служит амплитудно-временная калибровочная характеристика с предельными параметрами, для определения которых последовательно измеряют...» (и далее по формуле изобретения в редакции заявителя) для ясного и понятного осуществления всех приемов предложенного способа.

Авторы благодарят эксперта за внимательное изучение материалов заявки, положительную экспертную оценку и просят продолжить экспертизу по существу согласно «откорректированной формулы, не содержащей признаки, мешающие признанию осуществимости способа».

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ тонометрии глаза, заключающийся в организации исследуемого и опорного сигналов при воздействии на глаз и лобную часть лица вибрирующим датчиком, который приближают к глазу и лобной части лица до наступления контакта с ними и действуют на глаз и лобную часть лица до момента исчезновения сигнала на выходе вибрирующего датчика, отводят вибрирующий датчик от глаза и лобной части лица, костная ткань которой служит стабильной мерой, отличающийся тем, что нормируемым эквивалентом служит амплитудно-временная калибровочная характеристика с предельными параметрами, для определения которых последовательно измеряют две амплитуды исследуемого и опорного сигналов в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , по которым рассчитывают предельные параметры исследуемой и опорной характеристик: предельную амплитуду и постоянную времени, по которым аппроксимируют исследуемую и опорную характеристики, из разницы которых находят действительную характеристику, по которой судят об офтальмотонусе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ тонометрии глаза и устройство для его осуществления / В.А. Пашков, Л.П. Чердниченко, В.К. Полтораки. А. с. 133171 СССР, А61В 3/16. 1957.
2. Способ тонометрии глаза и устройство для его осуществления / В.А. Пашков, Л.П. Чердниченко, В.К. Полтораки. А. с. 18233788 СССР, 61В 3/16. 1993. Бюл. № 23.
3. Патент № 2361506 РФ. Способ тонометрии глаза / Т.С. Соколова, Л.Ю. Иванова, Е.В. Калинина, Е.А. Леонтьев. А61В3/16. 2007.
4. Патент по заявке № 2015111776 РФ. Способ тонометрии глаза / А.А. Лунгина, А.В. Курганский, Е.И. Глинкин. А61В3/00, решение от 14.06.2016.

Поступила в редакцию 25 ноября 2016 г.

Лунгина Алена Алексеевна, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, магистрант по направлению подготовки «Биотехнические системы и технологии», кафедра биомедицинской техники, e-mail: alena-lungina@rambler.ru

Курганский Андрей Владимирович, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, магистрант по направлению подготовки «Биотехнические системы и технологии», кафедра биомедицинской техники, e-mail: cadam@mail.ru

Глинкин Евгений Иванович, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской техники, заслуженный изобретатель Российской Федерации, e-mail: glinkinei@rambler.ru

UDC 681.335

DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-1-121-125

## THE METHOD OF EYE TONOMETRY

© A.A. Lungina, A.V. Kurganskiy, E.I. Glinkin

Tambov State Technical University

106 Sovetskaya St., Tambov, Russian Federation, 392000

E-mail: glinkinei@rambler.ru

A method of eye tonometry from the calibration amplitude-time characteristic, which is the normalized equivalent and which eliminates methodical and dynamic error of assessment of intraocular pressure is proposed.

*Key words:* method of tonometry; time constant; limit voltage; amplitude-time characteristics; methodic and dynamic error

## REFERENCES

1. Pashkov V.A., Cherednichenko L.P., Poltorak V.K. *Sposob tonometrii glaza i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [The method of eye tonometry and tools for its implementation]. Author's license 133171 SSSR, A61V 3/16, 1957. (In Russian).
2. Pashkov V.A., Cherednichenko L.P., Poltorak V.K. *Sposob tonometrii glaza i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [The method of eye tonometry and tools for its implementation]. Author's license 18233788 SSSR, 61V 3/16, no. 23, 1993. (In Russian).
3. Sokolova T.S., Ivanova L.Yu., Kalinina E.V., Leont'ev E.A. *Sposob tonometrii glaza* [The method of eye tonometry]. Patent no. 2361506 RF, A61B3/16, 2007. (In Russian).
4. Lungina A.A., Kurganskiy A.V., Glinkin E.I. *Sposob tonometrii glaza* [The method of eye tonometry]. Patent no. 2015111776 RF, A61B3/00, 2016. (In Russian).

Received 25 November 2016

Lungina Alena Alekseevna, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Master's Degree Student on Training Direction "Biotechnical Systems and Technologies", Biomedical Technics Department, e-mail: alena-lungina@rambler.ru

Kurganskiy Andrey Vladimirovich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Master's Degree Student on Training Direction "Biotechnical Systems and Technologies", Biomedical Technics Department, e-mail: cadam@mail.ru

Glinkin Evgeniy Ivanovich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Doctor of Technics, Professor, Professor of Biomedical Technics Department, Honored Inventor of Russian Federation, e-mail: glinkinei@rambler.ru

### Информация для цитирования:

Лунгина А.А., Курганский А.В., Глинкин Е.И. Способ тонометрии глаза // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 1. С. 121-125. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-1-121-125

Lungina A.A., Kurganskiy A.V., Glinkin E.I. Sposob tonometrii glaza [The method of eye tonometry]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 121-125. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-1-121-125 (In Russian).