

УДК 629.7.642:681.32.17

ПОГРЕШНОСТИ БАРОМЕТРИЧЕСКИХ ВЫСОТОМЕРОВ НА ОСНОВЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ*Джангиров М.В., магистр**Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова**54025, г. Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9**E-mail: dzangirov@mksat.net*

В роботі розглянуті і досліджені інструментальні похибки барометричних висотомірів, зумовлені впливом зовнішніх збурень, і їх частка в формуванні загальної похибки. Проаналізовані особливості побудови барометричних висотомірів з використанням МЭМС технологій. Результати досліджень дають можливість врахування похибки від впливу температури, вологості, прискорень, електричних збурень.

Ключові слова: мікромеханічний датчик тиску, похибки, висотомір.

In the article considered and researched instrumental errors of barometric altimeters, caused by effect of external revolting influences, and their value in forming of general error. The features of construction barometric altimeters using MEMS technologies are analysed. The results of researches enable to consider errors from influencing of temperature, humidity, accelerations and electric disturbances.

Key words: micromechanical pressure sensor, errors, altimeter.

Введение. Для решения задач навигации и управления подвижными объектами кроме горизонтальных составляющих местоположения объекта необходимо знать также и его вертикальную составляющую, т. е. высоту относительно точки старта на поверхности земли или относительно уровня моря. Одним из способов получения этой информации является использование барометрических высотомеров, позволяющих определять высоту объекта над уровнем моря, используя зависимость изменения давления с высотой. Развитие вычислительной техники позволило проектировать микромеханические датчики барометрического давления, которые могут использоваться при создании высотомеров.

Анализ предыдущих исследований. Анализ литературных источников по барометрическим высотомерам показывает, что при разработке алгоритмов вычисления высоты в микропроцессоре не учитываются погрешности, вызванные влиянием вышечисленных возмущений, за исключением температурных [1]. В технических описаниях фирмы-изготовители барометрических высотомеров на основе микромеханических датчиков давления практически не рассматривают вопрос о погрешностях этих высотомеров и единственной компенсируемой погрешностью в них является температурная [2,3]. В данной работе производится систематизация погрешностей барометрического высотомера, рассматриваются внешние источники погрешностей барометрических высотомеров с целью их дальнейшего учета и устранения.

Метод определения высоты является косвенным (высота определяется путем измерения давления), поэтому на общую погрешность высотомера влияет погрешность датчика давления. Если предполагается использование готового датчика, то уменьшить

его инструментальные погрешности не представляется возможным.

Цель работы – учет инструментальных погрешностей при определении давления, возникающих из-за несовершенства конструкции, а также исследование влияния внешних факторов (нестабильность источника питания, гравитационное поле Земли, окружающая температура, внешнее линейное и вибрационное ускорение).

Материал и результаты исследования. Структурная схема барометрического высотомера на основе микромеханического датчика атмосферного давления представлена на рис. 1. Части схемы, изображенные пунктирной линией, могут отсутствовать или являться частями датчика давления или вычислителя. Например, многие микромеханические датчики давления содержат схемы усиления, термокомпенсации и выдают сигнал в цифровом виде, а вычислитель может быть представлен персональным или миниатюрным компьютером, который уже содержит в себе устройство отображения.

Рассмотрим каждую часть схемы отдельно и выделим присущие ей погрешности. Погрешности датчика давления относятся к инструментальным и определяются несовершенством конструкции (мембраны, резисторов и т.д.), технологией изготовления, постепенным износом и старением материалов, из которых изготовлен датчик.

Погрешности схемы усиления, термокомпенсации, преобразования выходного сигнала связаны с несовершенством электронных элементов, а также схем преобразования сигнала из аналогового в цифровой. Погрешности вычислителя связаны с алгоритмом вычисления высоты и разрядностью вычислителя.



Рисунок 1 – Структурная схема барометрического высотомера.

При определении полной погрешности датчика давления необходимо учесть весь комплекс погрешностей, порождаемых как недостатками конструкции и технологии производства (инструментальные погрешности), так и влиянием внешних условий. Выходной сигнал датчика давления может быть записан в следующем виде:

$$U_{\text{вых}} = S \left(1 + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\partial S / \partial T}{S} \cdot T + \frac{\partial S_{\text{гис}} / \partial F_{\text{упр}}}{S} \cdot F_{\text{упр}} + \frac{\partial S_{\text{гис}} / \partial T}{S} \cdot T \right) \cdot P_{\text{вх}} + \Delta U_{\text{см}} + \frac{\partial U_{\text{см}}}{\partial T} \cdot T + \Delta U_{\text{пш}} + \Delta U_{\text{уск}} + \Delta U_{\text{лог}}$$

где S – чувствительность датчика; $\alpha_S = \frac{\Delta S}{S}$ – погрешность линейности (отклонение статической характеристики преобразования датчика от идеальной прямой линии в заданном диапазоне давлений); $\alpha_{S(T)} = \frac{\partial S / \partial T}{S}$ – температурный дрейф чувствительности (изменение чувствительности, вызванное изменением температуры); $\alpha_{\text{гисмех}} = \frac{\partial S_{\text{гис}} / \partial F_{\text{упр}}}{S}$ – механический гистерезис; $\alpha_{\text{гистем}} = \frac{\partial S_{\text{гис}} / \partial T}{S}$ – температурный гистерезис; $P_{\text{вх}}$ – входное давление; $\Delta U_{\text{см}}$ – смещение нуля (наличие выходного напряжения, когда давления с обеих сторон диафрагмы датчика равны); $\alpha_{\text{см}} = \frac{\partial U_{\text{см}}}{\partial T}$ – температурный дрейф нуля (изменение смещения нуля, вызванное изменением температуры); $\Delta U_{\text{пш}}$ – погрешность полной шкалы (отклонение значения выходного напряжения, соответствующего крайним значениям диапазона измеряемого давления от паспортных характеристик); $\Delta U_{\text{уск}}$ – погрешность от влияния различного рода ускорений; $\Delta U_{\text{лог}}$ – погрешность логичности (отклонение пропорциональной зависимости выходного напряжения от питающего). Погрешности линейности и смещения нуля относятся к инструментальным погрешностям, остальные

погрешности вызваны влиянием внешних факторов.

Запишем выражение для выходного напряжения в общем виде:

$$U_{\text{вых}} = S(1 + \alpha) \cdot P_{\text{вх}} + \Delta U,$$

где

$$\alpha = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\partial S / \partial T}{S} \cdot T + \frac{\partial S_{\text{гис}} / \partial F_{\text{упр}}}{S} \cdot F_{\text{упр}} + \frac{\partial S_{\text{гис}} / \partial T}{S} \cdot T,$$

$$\Delta U = \Delta U_{\text{см}} + \frac{\partial U_{\text{см}}}{\partial T} \cdot T + \Delta U_{\text{пш}} + \Delta U_{\text{уск}} + \Delta U_{\text{лог}}.$$

Тогда входное давление будет равно:

$$P_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вых}} - \Delta U}{S(1 + \alpha)}.$$

Для идеализированного случая ($\alpha = 0, \Delta U = 0$):

$$P_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вых}}}{S}.$$

Пусть погрешность чувствительности равна 10%, т. е. $\alpha = 0,1$, а $\Delta U = 0$, тогда

$$P_{\text{вх1}} = \frac{U_{\text{вых}}}{S(1 + 0,1)} = \frac{U_{\text{вых}}}{1,1 \cdot S}.$$

$$\frac{P_{\text{вх ид}}}{P_{\text{вх1}}} = \frac{U_{\text{вых}} \cdot 1,1 \cdot S}{U_{\text{вых}} \cdot S} = 1,1,$$

т.е. увеличение чувствительности приводит к уменьшению давления по отношению к идеализированному случаю и соответственно наоборот.

Пусть погрешность смещения нуля равна 10% от выходного напряжения, т. е. $\alpha = 0$, а $\Delta U = 0,1 \cdot U_{\text{вых}}$, тогда

$$P_{\text{вх1}} = \frac{U_{\text{вых}} - 0,1 \cdot U_{\text{вых}}}{S} = \frac{0,9 \cdot U_{\text{вых}}}{S};$$

$$\frac{P_{\text{вх ид}}}{P_{\text{вх1}}} = \frac{U_{\text{вых}} \cdot S}{0,9 \cdot U_{\text{вых}} \cdot S} = \frac{1}{0,9} \approx 1,1,$$

таким образом, увеличение смещения нуля также приводит к уменьшению давления по отношению к идеализированному и наоборот.

В общем случае:

$$\Delta p = P_{\text{вх}} - P_{\text{вх ид}} = \frac{U_{\text{вых}} - \Delta U}{S(1 + \alpha)} - \frac{U_{\text{вых}}}{S} = \frac{U_{\text{вых}}}{S} - \frac{\alpha U_{\text{вых}} + \Delta U}{S(1 + \alpha)} - \frac{U_{\text{вых}}}{S} = - \frac{\alpha U_{\text{вых}} + \Delta U}{S(1 + \alpha)}.$$

Для значений $\alpha = 0,1$ и $\Delta U = 0,1 \cdot U_{\text{вых}}$, получаем

$$\Delta p = -\frac{\alpha U_{\text{ВЫХ}} + \Delta U}{S(1 + \alpha)} = -\frac{0,1 \cdot U_{\text{ВЫХ}} + 0,1 \cdot U_{\text{ВЫХ}}}{1,1 \cdot S} =$$

$$\frac{P_{\text{ВХ}}}{P_{\text{ВХ ид}}} = \frac{\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{S} - \frac{0,2 \cdot U_{\text{ВЫХ}}}{1,1 \cdot S}}{\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{S}} = 1 - \frac{0,2}{1,1} \approx 0,82.$$

Рассмотрим каждую составляющую погрешности. Погрешность линейности $\Delta S/S$ обычно дается в техническом описании на датчик давления. Существует несколько способов определения этой погрешности. Один из них состоит в использовании

метода наименьших квадратов, который математически обеспечивает получение прямой линии наилучшего приближения к реальной характеристике преобразования (рис. 2, а)). Другой метод состоит в том, что проводится прямая линия (хорда) между начальной и конечной точками статической характеристики преобразования (L_1 на рис. 2, б)). Затем находят максимальную длину нормали между прямой и реальной характеристикой (стрелку прогиба). Длина этого отрезка и представляет предельную основную погрешность линейности.

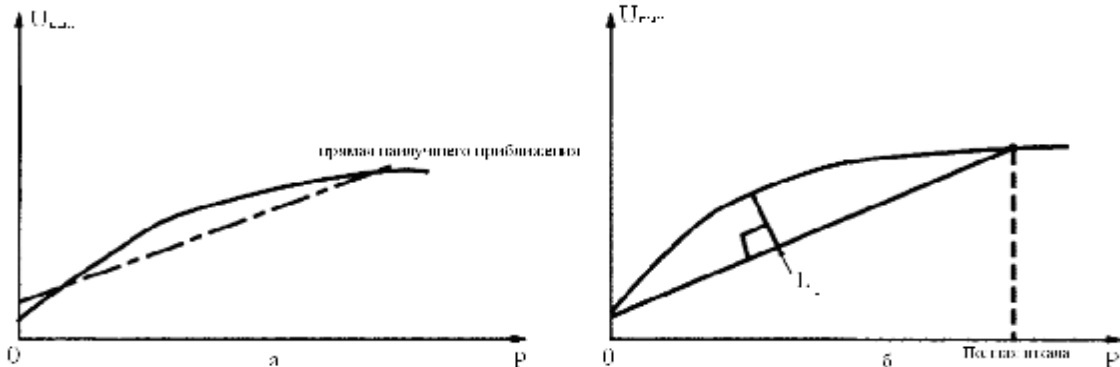


Рисунок 2 – Способы определения погрешности линейности датчика давления:

а) по методу наименьших квадратов, б) по максимальному расстоянию между характеристикой преобразования и стягивающей ее хордой.

Температурный дрейф чувствительность является важной характеристикой датчиков давления. Он всегда указывается в числе основных параметров датчика. Большинство производителей датчиков нормируют температурный дрейф с помощью линейного температурного коэффициента, т.е. в процентах от диапазона измерения выходного сигнала датчика на один градус Цельсия ($\%/^{\circ}\text{C}$). Знак температурной погрешности может быть любой, поэтому он указывается как $\pm\alpha_{S(T)} \%/^{\circ}\text{C}$. Однако, такая неопределенность в знаке приводит к увеличению погрешности определения давления в 2 раза. Так при точно известном знаке погрешность определения давления из-за влияния температуры равна [4]:

$$\Delta P = \alpha_{S(T)} \cdot (T_{\text{изм}} - T_{\text{н}}),$$

где $T_{\text{изм}}$ – измеренная температура; $T_{\text{н}}$ – «нормальная» температура (обычно 25°C).

При неопределенном знаке температурного дрейфа погрешность в измерении давления равна:

$$\Delta P = 2 \cdot \alpha_{S(T)} \cdot (T_{\text{изм}} - T_{\text{н}}).$$

Однако, если температура измерения не известна, а известно, что она лежит в пределах $(T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}})$ рабочего интервала температур, то результирующая ошибка измерения давления составляет:

$$\Delta P = \left| \alpha_{S(T)} \right| \cdot (T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}})$$

вне зависимости от того, известен знак температур-

ного дрейфа или нет.

Эти формулы применимы в случае линейной зависимости выходного сигнала от температуры. Поскольку для полупроводников характерна сильная и нелинейная зависимость параметров от температуры, то выходной сигнал полупроводниковых тензорезисторных датчиков нелинейно зависит от температуры. Например, для датчиков давления на основе структур «кремний на сапфире» и кремневых преобразователей с диффузорными или имплантированными тензорезисторами, зависимость выходного сигнала от температуры близка к параболической. В соответствии с [5], если нормировать температурную погрешность линейным коэффициентом, то необходимо указывать максимальное (по абсолютной величине) значение наклона $\alpha_{S(T)\text{макс}}$ касательной к параболе. В результате нормативную суммарную температурную погрешность в рабочем интервале температур $(T_{\text{мин}} \dots T_{\text{макс}})$ следует определять по формуле [4]:

$$\Delta P = \left| \alpha_{S(T)\text{макс}} \right| \cdot (T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}).$$

Гистерезис характеристики преобразования представляет собой совокупность механического и термического гистерезиса. Механический гистерезис $\alpha_{\text{гис мех}}$, как и у акселерометров, связан с выходом диафрагмы за зону упругой деформации. Температурный гистерезис $\alpha_{\text{гис тем}}$ проявляется в не-

совпадении показаний при нагреве датчика с последующим охлаждением до первоначальной температуры.

Смещение нуля $\Delta U_{см}$ и температурный дрейф смещения нуля $\alpha_{см}$ также относятся к основным характеристикам датчика давления и обязательно указываются в технической документации на датчик. В мостовых датчиках направление температурного дрейфа не может быть предсказано заранее. В датчиках типа X-ducer фирмы Motorola направление смещения нуля определяется знаком изменения температуры.

Погрешность логотричности обычно составляет 1...2%.

Рассмотрим более подробно погрешность от различных ускорений. При статических измерениях на датчик давления действует только ускорение свободного падения, однако, если датчик давления находится на подвижном объекте, на него воздействует также линейное и вибрационное ускорение объекта.

Уравнение движения мембраны постоянной толщины под действием разности давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ соответствуют уравнениям, описывающим динамику жестко заземленной по контуру пластины под действием распределенной нагрузки.

Уравнение движения мембраны с жестким центром, когда помимо давления микромеханический датчик давления подвержен действию сил инерции, обусловленных линейным и вибрационным ускорением, имеет вид:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + G_y y = m(a - g + \ddot{y}_B) + \Delta p S,$$

где m – масса жесткого центра; b_y, G_y – коэффициент демпфирования и жесткость мембраны; y – линейное перемещение жесткого центра; a, \ddot{y}_B, g – линейное, вибрационное и ускорение силы тяжести; S – площадь жесткого центра, воспринимающего давление.

В установившемся режиме ($\dot{y} = \ddot{y} = 0$) имеет место смещение жесткого центра на величину:

$$y = \frac{[m(a - g + \ddot{y}_B) + \Delta p S]}{G_y},$$

которая содержит информацию об измеряемом давлении.

Из выражения (2) следует также, что любое ускорение вызывает погрешность в измерениях микромеханического датчика давления.

Относительную ошибку, обусловленную влиянием различного рода ускорений, можно определить из уравнения (2) [6]

$$\delta = \frac{a_m b_m c_m \cdot \rho \cdot (a - g - \ddot{y}_B)}{\Delta p_{max} a_m b_m} \cdot 100\% = \frac{c_m \cdot \rho \cdot (a - g - \ddot{y}_B)}{\Delta p_{max}} \cdot 100\%,$$

где a_m, b_m, c_m – размеры жесткого центра, ρ –

плотность жесткого центра, Δp_{max} – диапазон измеряемых давлений.

Ускорение свободного падения зависит от географической широты и высоты над поверхностью земли, уменьшаясь на $3,086 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$ на каждый метр выше уровня моря. Таким образом:

$$g = 9,78049 \cdot (1 + 5,288 \cdot 10^{-3} \cdot \sin^2 \varphi - 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot \sin^2 2\varphi) - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot H,$$

где g – ускорение свободного падения в измеряемой точке [м/с^2], φ – географическая широта [град], H – высота над уровнем моря [м].

Влияние линейного ускорения a рассмотрим для случаев: $a = -10 \text{ К} 10 \text{ м/с}^2$.

Вычислим погрешность, вносимую линейной вибрацией основания для исходных данных:

$$\Delta p_{max} = 15 \dots 115 \text{ кПа} = 10^5 \text{ Па}, \quad \rho = 2,33 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \\ c_m = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad y_B = y_{B0} \cos \omega t, \quad y_{B0} = 10^{-2} \text{ м}, \\ \omega = 100 \text{ Гц} = 628 \text{ 1/с}.$$

Амплитудное значение вибрационного ускорения равно ($\cos \omega t = 1$):

$$\ddot{y}_B = -\omega y_{B0} \sin \omega t;$$

$$\dot{y}_B = -\omega^2 y_{B0} \cos \omega t;$$

$$|\dot{y}_B| = \omega^2 y_{B0} = 628^2 \cdot 10^{-2} = 3947,84 \text{ м/с}^2.$$

По формуле (3) получаем:

$$\delta = \frac{c_m \cdot \rho \cdot (a - g - \dot{y}_B)}{\Delta p_{max}} \cdot 100\% = \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2,33 \cdot 10^3 \cdot (0,1 - 9,78049 - 3947,84)}{10^5} \cdot 100\% \approx 4,61\%.$$

На рис. 3 приведена зависимость изменения относительной погрешности от значения линейного ускорения при возмущающем ускорении заданном выше.

Как видно из расчетов на точность наибольшее влияние оказывает вибрационное ускорение. При его отсутствии относительная погрешность не превышает 0,025%.

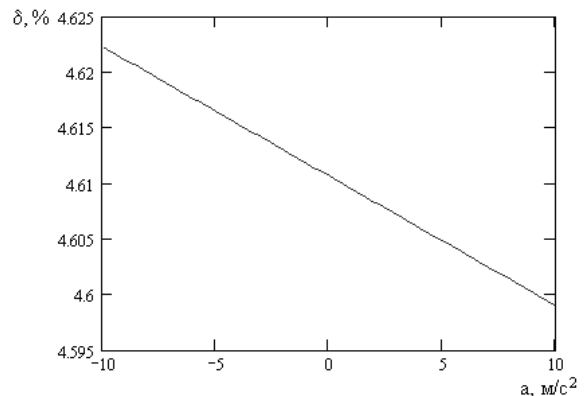


Рисунок 3 – Изменение относительной погрешности измерения давления в зависимости от величины а

Определим погрешность, возникающую в вычислителе при использовании гипсометрической формулы для вычисления высоты. Погрешность функции нескольких переменных при косвенных измерениях никогда не превышает величину [7]:

$$\delta q \leq \left| \frac{\partial q}{\partial x} \right| \delta x + \dots + \left| \frac{\partial q}{\partial z} \right| \delta z,$$

где $q(x, z)$ – функция, погрешность которой необходимо вычислить; $x \dots z$ – входные переменные; $\delta x \dots \delta z$ – погрешности измерений.

Вычисления высоты могут производиться по гипсометрической формуле:

$$H = \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{R \cdot t_{гр}} \right] \cdot (T_0 / t_{гр}), \quad (1)$$

или формула Лапласа

$$H = R \left(\frac{T_0 + T_H}{2} \right) \ln \frac{P_0}{P},$$

где $R = 29,27$ [м/град] – газовая постоянная; P_H – давление на высоте H [Па]; P_0 – давление на поверхности земли [Па]; T_0 – температура на поверхности земли [K]; $t_{гр} = 0,0065$ [град/м] – градиент изменения температуры с высотой.

Таким образом, для формулы (1) максимальная погрешность измерения высоты равна [8]:

$$\Delta H = \left| \frac{\partial H}{\partial P_H} \right| \cdot \Delta P_H + \left| \frac{\partial H}{\partial P_0} \right| \cdot \Delta P_0 + \left| \frac{\partial H}{\partial T_0} \right| \cdot \Delta T_0,$$

где $\Delta P_H, \Delta P_0$ – погрешности измерения давления на высоте H и на поверхности земли соответственно; ΔT_0 – погрешность измерения температуры на поверхности земли.

Уменьшение абсолютной погрешности измерений может быть достигнуто уменьшением погрешностей измерения давления и температуры или применением формул для барометрического нивелирования, например, полной формулы Лапласа:

$$h = K_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_m) \cdot (1 + 0,378 \cdot e_m / p_m) \times \\ \times (1 + \beta \cdot \cos 2\varphi_m) \cdot \left(1 + \frac{2H_m}{R} \right) \cdot \lg \frac{p_1}{p_2},$$

где p_1 и p_2 – давление воздуха на высоте h_1 и h_2

соответственно; p_m – среднее значение давления, H_m – среднее значение высоты; t_m, e_m – среднее значение температуры и влажности воздуха; φ_m – среднее значение широты; $\alpha = 0,003665 \approx \frac{1}{273}$ град⁻¹ – температурный коэффициент объемного расширения воздуха; $\beta = 0,00265$; K_0 – коэффициент, равный 18400 при некоторых стандартных значениях давления воздуха и силы тяжести.

Выводы. В работе систематизированы погрешности барометрических высотомеров, построенных на основе микромеханических датчиков атмосферного давления, а также исследовано влияние погрешностей датчика давления, входящего в состав высотомера на общую погрешность системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Шумков Применение датчиков давления в системах навигации // Chip News #8 (91), 2004. – С. 18-21.
2. Using MS5534 for altimeters and barometers, Application Note, Intersema, AN501, April 24th 2002.
3. Altimeter and Barometer System, Application Note, Freescale Semiconductor, AN1979, Rev 3, 11/2006.
4. В. М. Стучебников О нормировании температурной погрешности тензорезисторных полупроводниковых датчиков, ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ, 2004, №9. – С.15-19.
5. Датчики давления, разряжения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. Общие технические условия./ ГОСТ 22520-85.
6. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение. – 2007.
7. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. Пер. с англ. – М: Мир, 1985. – 272 с.
8. Джангиров М.В., Снигур А.К. Анализ погрешностей различных барометрических формул, используемых в навигационных системах. Проблемы автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2007. – 304 с.

Стаття надійшла 14.05.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.