

**МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Московский государственный институт электроники и математики
(Технический университет)

Кафедра «Технологические
системы электроники»

Магнитный электроразрядный насос

Методические указания
к лабораторной работе № 5
по курсу «Вакуумная техника»

Москва 2002

МАГНИТНЫЙ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЙ НАСОС

Составитель канд. техн. наук, доц. Ю.Д. Плотников

Методические указания к лабораторной работе являются составной частью программы по дисциплине "Вакуумная техника", изучаемой студентами 4 курса специальности 20.05 - Электронное машиностроение.

Лабораторная работа выполняется в объеме 3 часов.

Основным содержанием работы является изучение принципа действия, конструкции и характеристик высоковакуумного насоса НМДО-0,1-1 и вакуумного агрегата ЭРА-100-2.

УДК 621.53

Магнитный электроразрядный насос: метод. указания к лаб. р. по курсу "Вакуумная техника" / Мос. гос. ин-т электроники и математики; Сост. Ю.Д. Плотников. М., 2002 г. 15 с.

Табл. 2. Ил. 8.

ISBN 5-230-16355

Цель работы: ознакомиться с принципом действия, конструкцией и основными рабочими характеристиками высоковакуумного магнитного электроразрядного насоса НМДО-0,1-1.

Содержание работы: ознакомиться с конструкцией насоса и его основных узлов;

- ознакомиться с элементами агрегата ЭРА-100-2;
- научиться запускать вакуумный агрегат;
- экспериментально определить основные характеристики насоса НМДО-0,1-1.

Теоретические основы работы магнитного электроразрядного насоса

Постепенное исчезновение газа в газоразрядных трубках низкого давления отмечалось исследователями еще в середине 50-х годов прошлого столетия. В таких трубках по мере уменьшения давления увеличивалось напряжение, необходимое для прохождения тока через трубку и, наконец, трубка становилась "непроводящей". Это явление связано с эффектом электрического поглощения газов.

Если в объеме возникает тлеющий газовый разряд, то образующиеся ионы газа ускоряются согласно уравнению

$$m_i v_i^2 = eU \quad \text{или} \quad v_i = 1,4 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{T}{M}},$$

где m_i и v_i обозначают массу и скорость положительного иона, e - заряд электрона, U - падение напряжения, M - молекулярная масса газа, который образует положительные ионы. Если энергию частиц, движущихся в электрическом поле, определить через температуру, то эквивалентная температура определяется соотношением

$$T = 7,7 \cdot 10^3 U.$$

Так, например, если образовавшийся ион газа двигается в электрическом

поле с потенциалом 1000 В, то его энергия соответствует энергии молекулы газа, имеющей температуру $7,7 \cdot 10^6$ К. Таким образом, энергия положительного иона газа является как бы материальной основой явления "электрического" поглощения газов.

В основе действия магниторазрядных насосов положена ионизация газов движущейся плазмой, состоящей главным образом из электронов. Удержание плазмы в замкнутом объеме обеспечивается наложением электрического и магнитного полей. Источником плазмы является самостоятельный газовый разряд в постоянном магнитном поле. При низком давлении газа и достаточной величине магнитного поля электроны существуют в разряде значительно дольше, чем ионы; этим и объясняется возможность существования плазмы до давлений 10^{-10} Па, в то время как обычный тлеющий разряд (без магнитного поля) полностью прекращается при давлении 0,1 Па.

Непрерывное рождение электронов и ионов путем ионизации газа в разряде, уход ионов на катод насоса и связанные с этим вторичные явления распыления катода и поглощения газа составляют полезный эффект, то есть откачку.

Практическое осуществление магнитно-изолированного разряда реализуется в системе электродов, называемой ячейкой Пеннинга и являющейся элементарной откачной ячейкой магниторазрядного насоса (рис. 1).

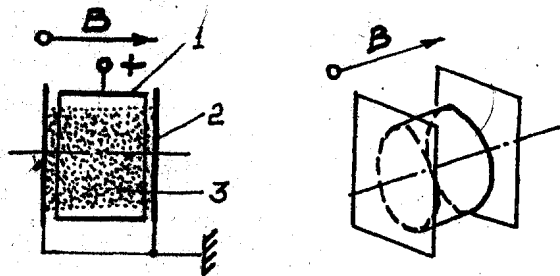


Рис. 1. Электроды ячейки Пеннинга

1 - анод; 2 - катоды; 3 - ионизированный газ

Напряжение между катодными пластинами и полым цилиндрическим ано-

дом создает внутри анода электрическое поле. Если разряда в газе нет, плотность электронов ничтожна; при зажигании разряда плотность электронной плазмы внутри анода лавинообразно нарастает до значений 10^{10} электрон/см³. Особый интерес в этом случае представляют траектории движения электронов внутри ячейки Пеннинга (см. рис.2).

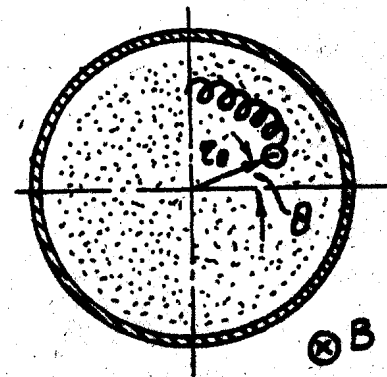


Рис. 2. Траектория движения электрона внутри ячейки Пеннинга под действием электрического и магнитного полей

Если представить себе движение электрона в плоскости (r, θ) , то оно складывается из двух составляющих. Во-первых, электрон колеблется около среднего радиуса r в соответствии с уравнением

$$r = r_0 + \frac{eE_r}{m\omega_{\text{ц}}^2} (1 - \cos \omega_{\text{ц}} t),$$

где r - радиус движения электрона;

e/m - отношение заряда электрона к его массе;

$\omega_{\text{ц}} = eB/m$ - циклотронная частота.

Во-вторых, электрон движется по азимуту с переменной угловой скоростью

$$\theta = \frac{eE_r}{m\omega_{\text{ц}} r_0} (1 - \cos \omega_{\text{ц}} t).$$

Существенно, что при своем движении в плоскости (r, θ) электрон не уда-

ляется от радиуса r_0 на расстояние, большее, чем $2r_{ц}$, то есть удвоенное значение циклотронного радиуса. Величина

$$r_{ц} = \frac{e E_r}{m \omega_{ц}^2}$$

Таким образом, если циклотронный радиус существенно меньше размеров полого анода (ячейки Пеннинга), то электроны, образующие плазму, оказываются магнитно-изолированными. Электрон обращается по циклоидальной траектории до тех пор, пока не испытает соударение с молекулой газа. Если это соударение приводит к ионизации молекулы, образовавшийся ион будет двигаться к катоду, а электрон компенсирует затраченную энергию тем, что переходит на орбиту ближе к поверхности анода в область более сильного электрического поля. В конечном счете электроны приближаются к аноду, а когда расстояние до анода становится равным $2r_{ц}$, электроны перехватываются анодом, образуя ток разряда. Благодаря этому между плазмой и поверхностью анода образуется слой с малой плотностью электронов, что и обеспечивает изоляцию электронной плазмы.

Магниторазрядный насос НМДО-0,1-1

Широкое применение в технике высокого вакуума нашли магнитные электроразрядные насосы, использующие откачивающее действие тлеющего газового разряда. Насосы типа НМДО (насосы магниторазрядные диодные охлаждаемые) предназначены для безмасляной откачки вакуумных систем и приборов, в технике физического эксперимента, пленочной технологии в диапазоне давлений от $0,1 \text{ Па}$ до 10^{-7} Па .

Конструкция насоса. Конструктивной основой насоса является сварной корпус (1) прямоугольной формы (рис. 3) из листовой нержавеющей стали 1Х18Н10Т. В верхней части корпуса насоса находится присоединительный фланец (2) с отверстием диаметром 160 мм. В боковых частях корпуса насоса предусмотрены глухие пазы, куда помещаются пластины оксидно-барьерных магнитов (9). Предусмотрена возможность прогрева внутренней арматуры насоса нагревателем (5), который состоит из нихромовой спирали (6), укреплен-

ной на керамических изоляторах и помещенной в полый герметичный корпус (7) через патрубок с фланцем (8) в нижней части насоса.

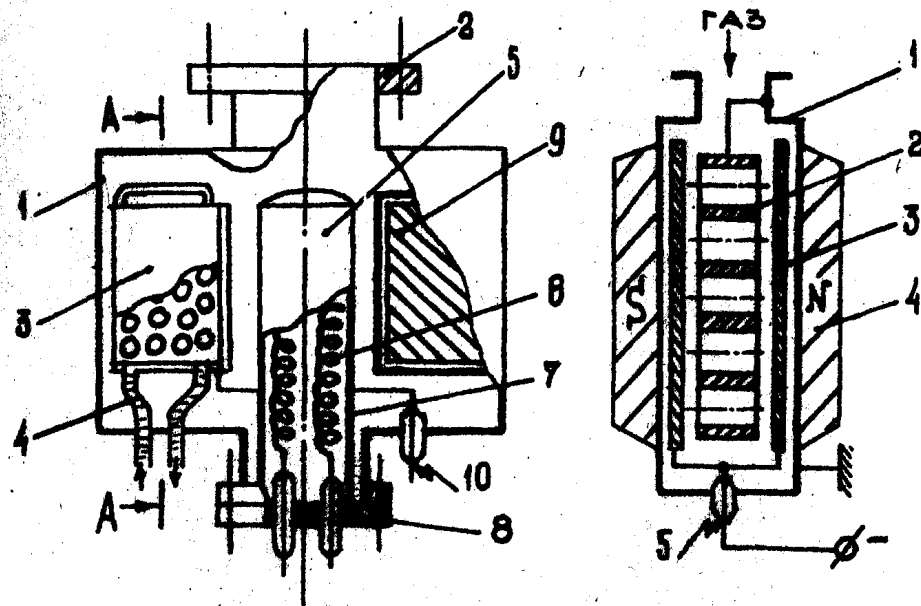


Рис. 3. Конструктивная схема насоса НМДО - 0.1-1

А-разрез насоса. 1-корпус; 2-входной патрубок; 3-электродный блок; 4-контур водяного охлаждения анода; 5-внутренний нагреватель; 6-нихромовая спираль; 7-корпус нагревателя; 8-опорный фланец нагревателя; 9-магнитная система; 10-токоввод.

Б-разрез электродного блока. 1-корпус; 2-ячеистый анод; 3-катодные пластины; 4-постоянный магнит; 5-высоковольтный токоввод.

Электродный блок (рис. 1Б) состоит из медного анода с круглыми полыми ячейками, который охлаждается водой, проходящей через впаянную в него трубку из нержавеющей стали. Анод заземлен на корпус, а на катодные пластины толщиной 1,5 мм из титата ВТ-1-0, замыкающие разрядный промежуток,

подается через высоковольтный вакуумный токоввод (5) постоянное напряжение 7 кВ от блока питания. Внутри насоса расположено четыре электродных блока (см. рис.4).

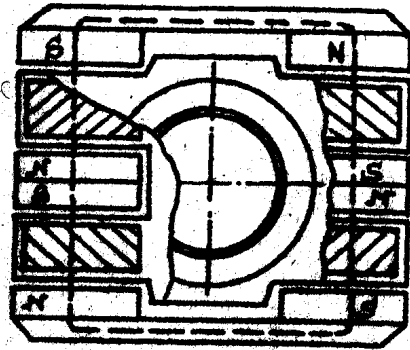


Рис.4. Схема расположения электродных блоков насоса и магнитной системы

Как видно из рис. 4, электродные блоки размещены в боковых полостях корпуса насоса и находятся в постоянном магнитном поле напряженностью 1000 эрстед, магнитная система насоса состоит из пластин оксидно-барьерных магнитов, объединенных в блоки, и двух магнитопроводов, которая образует замкнутый магнитный поток в разрядном пространстве электрод-блоков насоса.

Механизм откачки. При возникновении тлеющего разряда происходит ионизация газа, вследствие чего ионы газов устремляются к катодным пластинам, внедряясь в приповерхностный слой - возникает эффект ионной откачки. Одновременно энергия ионов газа затрачивается на распыление катода; распыленный металл, оседая на стенках насоса, электродах и т. д., действует как постоянно возобновляемая сорбирующая поверхность, на которой происходит хемосорбция активных газов. Следует отметить, что механизм откачки зависит от природы газа. Активные газы (азот, кислород) химически прочно связываются распыленным титаном. Легкие газы (водород, гелий) внедряются в тело катода и диффундируют вглубь него благодаря малым размерам ионов этих газов, а тяжелые инертные газы (аргон, ксенон), оседая на поверхности катода, замуровываются металлом, распыляемым с противоположных катодов.

Характеристики магниторазрядных насосов. Магниторазрядные насосы относятся к категории высоковакуумных и применяются для создания разрежения в диапазоне $0,1 - 10^{-7}$ Па. Основной технической характеристикой насоса является наибольшее давление запуска (старта), которое колеблется в диапазоне от 1 до 5 Па. Время старта или запуска насоса, определяемое как продолжительность откачки с давления запуска до 0,01 Па, может составлять для небольших вакуумных систем 1-2 минуты, а в системах с большими объемами до 30 мин. Быстрота откачки (скорость откачки) магниторазрядных насосов по воздуху в зависимости от впускного давления имеет следующий вид (см. рис. 5).

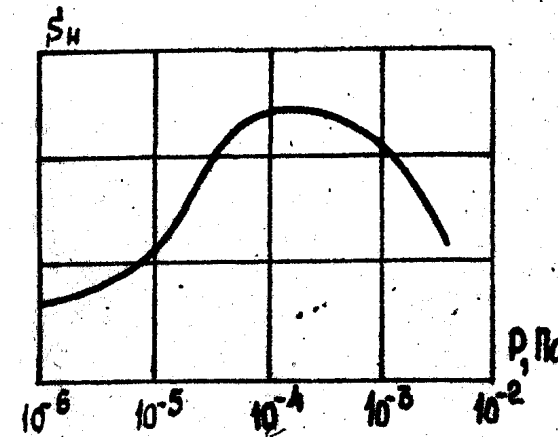


Рис.5. Зависимость быстродействия магниторазрядных насосов от давления газа

Следует отметить особенность работы магниторазрядных насосов - авторегулирование скорости распыления катодов, которое определяется зависимостью между давлением газа внутри насоса, величиной тока разряда и скоростью распыления титана с катодных пластин. Поскольку разрядный ток пропорционален давлению, то по его величине можно судить о вакууме в насосе и откачиваемом объеме (смотри рис. 6).

Промышленностью выпускается ряд магниторазрядных насосов типа НМДО или НМД с различной быстротой действия, который представлен в табл. 1.

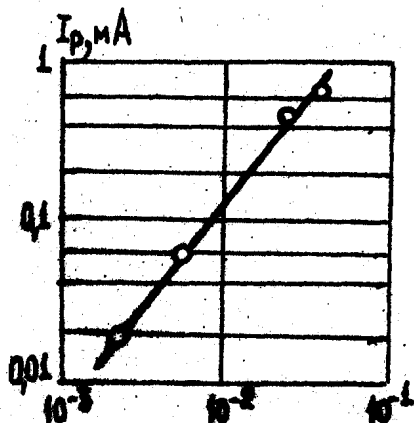


Рис. 6. Анодный ток как функция давления газа в магниторазрядном насосе

Характеристики магниторазрядных насосов серии НМДО (НМД)

Таблица 1

Характеристика	Тип насоса				
	НМДО-0,01-1	НМДО-0,025-1	НМДО-0,1-1	НМДО-0,25-1	НМДО-0,83-1
Быстрота действия по воздуху при $1 \cdot 10^{-3}$ Па, м/с	0,01	0,025	0,1	0,3	0,8
Предельное остаточное давление, Па	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Давление запуска насоса, Па	5	5	5	5	5
Диаметр всасывающего патрубка, мм	25	100	100	160	250
Масса насоса, кг	7,5	13,5	46	120	312
Мощность, потребляемая блоком питания, Вт	770	1550	4400	4000	18000

Оборудование и методика

Основной лабораторного стенда для измерения характеристик магниторазрядного насоса является типовой агрегат безмасляной откачки ЭРА-100-2, схема которого показана на рис. 7 в условных обозначениях.

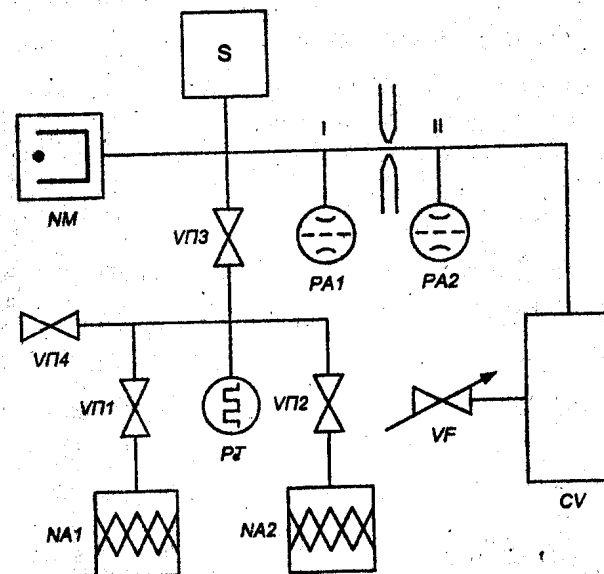


Рис. 7. Схема агрегата типа ЭРА для безмасляной откачки
 NM - магниторазрядный насос; NA - цеолитовый адсорбционный насос; VP - вакуумные клапаны; CV - вакуумная камера; VF - натека- тель; S - масс-спектрометр; PT, PA - манометрические преобразователи; I-II - вакуумпровод с калиброванной проводимостью.

Агрегат представляет собой вакуумную систему, в которой применяется принцип параллельного подсоединения средств откачки (насосов) к откачиваемому объему. Два цеолитовых насоса NA, работающих попеременно, обеспечивают предварительное разрежение (давление запуска) магниторазрядного насоса $1-5$ Па, а при необходимости - обезгаживание камеры CV и объема насоса NM. Высокий вакуум порядка $10^{-3} - 10^{-6}$ Па достигается после включения магниторазрядного насоса. Вакуумные клапаны VP1, VP2, VP3 предназначены для коммутации насосов, клапан VP4 предусматривает подключение механического насоса для откачки больших объемов газа. Масс-спектрометр S предназначен для анализа остаточной газовой среды в вакуумной системе CV.

Измерительная часть установки состоит из участка вакуумпровода 1-2, соединяющего камеру CV с магнитоэридным насосом NM, который имеет калиброванную проводимость (капилляр или диафрагма), натекателя VF и двух ионизационных вакуумметров PA1, PA2. Быстрота действия насоса определяется из формулы

$$S_n = Q_n / P_n$$

Для измерения потока газа, попадающего в насос, применяется метод калиброванного сопротивления. Суть метода состоит в том, что искомый поток газа создает на калиброванном участке вакуумной системы (см. рис. 8) разность давлений, которая измеряется манометрическими датчиками по обе стороны диафрагмы.

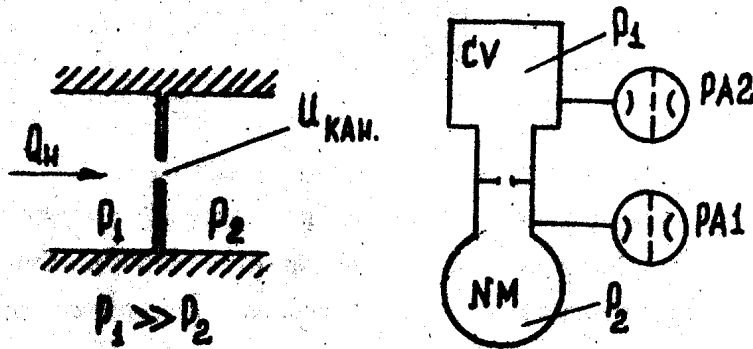


Рис. 8. Схема измерения потока газа методом калиброванного сопротивления

Поток газа рассчитывается по формуле

$$Q_n = U_k (P_1 - P_2),$$

где U_k - расчетное значение проводимости диафрагмы, м³/с;

P_1, P_2 - показания вакуумметров PA1 и PA2 соответственно, Па.

Примечание: полагаем, что проводимость диафрагмы пренебрежительно мала по сравнению с проводимостью коммуникации, соединяющей насос NM с камерой CV.

Порядок выполнения работы

1. Измерение предельного давления.

Ввести в действие вакуумный агрегат в следующем порядке:

а) залить жидкий азот в сосуд Дьюара, предварительно надетый на один из цеолитовых адсорбционных насосов NA;

б) через 10-16 минут после заливки жидкого азота и охлаждения адсорбента до температуры 77 К последовательно открыть клапаны VII1 (или VII2) и VII3; откачать рабочую камеру CV и насос NM до давления 5 Па, контролируя вакуум по вакуумметру PT;

в) включить блок питания магнитоэридного насоса NM и в соответствии с инструкцией по эксплуатации подать высокое напряжение на электродные блоки насоса NM; контролировать по показаниям вакуумметра PA1 ход откачки, записывая данные через каждые 6 минут. Построить график зависимости давления в камере CV от времени работы насоса NM с момента его включения.

2. Измерение быстродействия магнитоэридного насоса.

2.1. На установке получить предельное давление в камере при полностью закрытом натекателе VP.

2.2. Зафиксировать показания вакуумметров PA1 и PA2 и занести в табл. 2.

2.3. Посредством плавного напуска газа в камеру CV через натекатель VF увеличивать давление газа, фиксируя показания датчиков PA1 и PA2.

Таблица 2

$P_{\text{кам.}}$	Па	
$P_{\text{нас.}}$	Па	
$S_{\text{нас.}}$	м ³ /с	
$Q_{\text{нас.}}$	Па м ³ /с	

2.4. Пользуясь числовыми значениями табл. 2 и формулой для расчета потока газа $Q_{\text{нас.}} = U_{\text{отв.}} (P_1 - P_2)$ необходимо рассчитать ряд значений быстродействия $S_{\text{нас.}}$ и производительности $Q_{\text{нас.}}$ магнитоэридного насоса NM. Построить графические зависимости типа $S_n = f(P_n)$, $Q_n = f(P_n)$.

Форма отчета

В отчете должны быть представлены:

а) схема элементарного откачивающего объема (ячейки Пеннинга);

- б) эскиз электродного блока насоса НМДО;
 в) схема вакуумного агрегата в условных графических обозначениях;
 г) табличные данные и графические зависимости, полученные в ходе выполнения лабораторной работы.

Примечание: все графики выполняются на миллиметровке в логарифмическом или полулогарифмическом масштабе.

Вопросы к зачету

1. Каким явлением обусловлен эффект электрического поглощения газов?
2. В чем состоит откачивающее действие самостоятельного газового разряда?
3. Что такое ячейка Пеннинга?
4. Основные конструктивные узлы магниторазрядного насоса?
5. Основные элементы электродного блока насоса?
6. Как понимать эффект ионной откачки газов?
7. Чем обусловлено явление распыления катодных пластин?
8. Как проявляется хемосорбирование газов в процессе откачки?
9. Сформулируйте основные характеристики магниторазрядных насосов?
10. Что такое авторегулирование скорости распыления катодов? По какому параметру контролируется этот процесс?
11. Сформулируйте принцип построения схемы вакуумного агрегата на базе магниторазрядного насоса?
12. В чем существо метода измерения скорости откачки, принятого в лабораторной работе?

Составитель: канд. техн. наук, доц. Ю.Д. Плотников

Рецензент: канд. техн. наук, доц. Е.К. Куломзин

Методические указания рассмотрены на заседании кафедры «ал» мат 2002 г. (Протокол № 5) и приняты к применению в учебном процессе.

Заведующий кафедрой ТСЭ

Львов Б.Г.

Учебное издание

Магнитный электроразрядный насос

Составитель
 ПЛОТНИКОВ Юрий Дмитриевич

Редактор С.П. Клышинская
 Технический редактор О.Г. Завьялова

<http://www.miem.edu.ru/rio/>
rio@miem.edu.ru

Подписано в печать 27.05.02. Формат 60x84/16.
 Бумага типографская № 2. Печать - ризография.
 Усл.печ. л. 1,0 Уч.-изд. л. 0,8 Тираж 50 экз.
 Заказ - 136. Бесплатно Изд № 46.

Московский государственный институт электроники и математики

109028 Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3/12.

Отдел оперативной полиграфии Московского государственного института электроники и математики.

113054 Москва, ул. М. Пионерская, 12.