

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**А.Н. Носков**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ  
ХОЛОДИЛЬНОГО ПОРШНЕВОГО  
КОМПРЕССОРА**



**Санкт-Петербург  
2022**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**А.Н. Носков**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ**  
**ХОЛОДИЛЬНОГО ПОРШНЕВОГО**  
**КОМПРЕССОРА**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлению подготовки 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и  
системы жизнеобеспечения  
в качестве Учебно-методического пособия для реализации основных  
профессиональных образовательных программ высшего образования  
бакалавриата

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург  
2022

Носков А.Н., Исследование рабочих процессов холодильного поршневого компрессора – СПб: Университет ИТМО, 2022. – 32 с.

Рецензент(ы):

Зимков Артур Анатольевич, К.Т.Н., нет, ведущий инженер проектного отдела, ООО "ОК";

Для исследования рабочих процессов машин объемного принципа действия широко применяется метод индцирования. Приводится обзор методов индцирования, а также принципа работы электро-пневматического индикатора. Изложена методика индцирования и обработки экспериментальных данных, полученных на стенде для испытания холодильного поршневого компрессора. Приводится методика определения экспериментальным и расчетным путем основных параметров работы холодильного поршневого компрессора



**Университет ИТМО** – национальный исследовательский университет, ведущий вуз России в области информационных, фотонных и биохимических технологий. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию – ICPC (единственный в мире семикратный чемпион), Google Code Jam, Facebook Hacker Cup, Яндекс.Алгоритм, Russian Code Cup, Topcoder Open и др. Приоритетные направления: IT, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication. Входит в ТОП-100 по направлению «Автоматизация и управление» Шанхайского предметного рейтинга (ARWU) и занимает 74 место в мире в британском предметном рейтинге QS по компьютерным наукам (Computer Science and Information Systems). С 2013 по 2020 гг. – лидер Проекта 5–100.

© Университет ИТМО, 2022

© Носков А.Н., 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Индицирование как метод исследования термодинамических процессов поршневых машин .....	5
2. Устройство и принцип действия индикатора .....	7
3. Запись индикаторной диаграммы .....	11
4. Обработка индикаторной диаграммы .....	13
5. Расчетное определение параметров работы холодильного поршневого компрессора .....	20
6. Отчет о работе .....	22
ПРИЛОЖЕНИЕ ..	23
Список литературы .....	29

## ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Термодинамические процессы холодильной, криогенной техники и систем жизнеобеспечения».

Целью преподавания дисциплины является изучение студентами термодинамических процессов в основных элементах холодильных машин и их влияние на эффективность работы всей криогенной установки.

Основным элементом холодильной машины является компрессор. От эффективности его работы зависит энергетическая эффективность и надежность работы холодильной машины.

Одним из наиболее распространенных типов холодильных компрессоров объемного принципа действия являются поршневые компрессоры. Они обладают высокими энергетическими показателями, а технология их производства хорошо отлажена. Поршневые компрессоры широко используются в области малой и средней производительности: в домашних холодильниках, холодильных шкафах, морозильных камерах, системах кондиционирования воздуха для торговых прилавков [3,4]. Поршневые компрессоры могут работать как на аммиаке, так и на чистых фреонах и их смесях [5].

Исследование термодинамических процессов, происходящих в рабочей полости компрессора, позволяет определить объемные и энергетические характеристики компрессора и основные виды потерь в процессах всасывания, сжатия и нагнетания, а также наметить основные пути совершенствования компрессоров.

В результате изучения методов исследования рабочих процессов студенты должны знать устройство и принцип действия индикатора мгновенного давления, уметь записывать давление в рабочей полости компрессора, расшифровывать индикаторную диаграмму и производить ее свертывание. Анализируя полученную свернутую индикаторную диаграмму, студент должен определить основные объемные и энергетические показатели работы компрессора.

Для проверки полученных экспериментальных характеристик компрессора производится их расчетное определение.

Анализируя полученные результаты, даются рекомендации по совершенствованию термодинамических процессов, происходящих в компрессоре.

# 1. ИНДИЦИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОРШНЕВЫХ МАШИН

Экспериментальное исследование термодинамических процессов, происходящих в рабочей полости компрессора, позволяет определить мгновенные значения давлений и температур в процессах всасывания, сжатия и нагнетания.

Для исследования рабочих процессов машин объемного принципа действия (двигателей, компрессоров, насосов) наиболее часто применяется метод индицирования по давлению, называемый в дальнейшем для краткости индицированием. Под индицированием понимают автоматическую запись индикаторной диаграммы, т. е. зависимости циклически переменного давления в рабочей полости цилиндра от параметра, определяющего положение поршня в поршневой машине или ротора - в ротационной машине. При исследовании поршневого компрессора в качестве такого параметра используют либо угол поворота коленчатого вала (пропорциональная величина - время), либо ход поршня (пропорциональная величина - мгновенный объем цилиндра). В первом случае индикаторную диаграмму называют развернутой, во втором случае - свернутой. Более наглядной и удобной для обработки и анализа является свернутая индикаторная диаграмма. Площадь замкнутого контура этой диаграммы пропорциональна индикаторной мощности, т. е. мощности, расходуемой на осуществление рабочих процессов компрессора: всасывания, сжатия, нагнетания и обратного расширения пара, оставшегося в мертвом пространстве.

По индикаторной диаграмме можно определить индикаторный объемный коэффициент, показатели политроп процессов сжатия и обратного расширения и другие параметры, характеризующие работу компрессора. Индицирование в условиях эксплуатации является важным средством дефектоскопии компрессоров, которое позволяет произвести своевременный ремонт и повысить эффективность их работы.

При исследовании компрессоров наряду с индицированием предусматривают, как правило, возможность измерения массовой производительности, эффективной и электрической мощностей и других параметров компрессора. Все это, вместе взятое, позволяет получить всесторонние характеристики исследуемого объекта.

Приборы для записи индикаторных диаграмм по принципу действия подразделяют на электронные, электропневматические и механические [1].

В электронных индикаторах используются пьезоэлектрические или тензометрические датчики. Действие пьезоэлектрических датчиков основано на том, что при сжатии в них возникает электрический заряд, пропорциональный давлению.

В тензометрическом датчике при повышении давления деформируется упругая мембрана и, соответственно, изменяются размеры и электрическое сопротивление тонких проволок, наклеенных на мембрану и включенных в измерительную схему прибора. Электрический сигнал усиливается и подается на показывающий (катодный) или записывающий (шлейфовый) осциллограф.

Шире распространены пьезоэлектрические индикаторы, характеризующиеся большей надежностью, удобством в эксплуатации; преимущество пьезоэлектрического датчика - более простой способ определения масштаба давлений.

В электропневматическом индикаторе диаграмма получается путем фиксации отдельных точек, соответствующих моменту равенства давлений в рабочей полости цилиндра и в пневматической системе.

Механический индикатор по принципу действия представляет собой пружинно-поршневой манометр с записывающим устройством. Сравнительно низкая частота собственных колебаний является основным недостатком, не позволяющим применять этот тип индикатора для исследования современных высокоскоростных компрессоров.

В настоящей лабораторной работе проводится индицирование холодильного прямооточного компрессора АВ22 с помощью электропневматического индикатора МАИ-2, предназначенного для индицирования поршневых двигателей и компрессоров в широком интервале рабочих давлений и частот вращения коленчатых валов. Одновременно с индицированием измеряются внешние давления и температуры, а также перепад давлений на дроссельном расходомерном устройстве.

Ниже приводятся технические данные исследуемого компрессора:

диаметр цилиндра .....  $D = 82$  мм;  
ход поршня.....  $s = 70$  мм;  
длина шатуна .....  $l = 200$  мм;  
число цилиндров .....  $z = 2$ ;  
относительное мертвое пространство.....  $c_0 = 4,5$  %;  
частота вращения вала компрессора.....  $n = 16$  с<sup>-1</sup>.

## 2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ИНДИКАТОРА

Электропневматический, стробоскопический индикатор МАИ-2 предназначен для индицирования компрессоров, двигателей внутреннего сгорания и других поршневых машин с частотой вращения коленчатого вала до  $85 \text{ с}^{-1}$  и изменением давления в рабочей полости цилиндра в пределах от 0,0784 до 14,7 МПа или от 0,8 до 150 ата.

Индикатор обеспечивает запись диаграмм в десяти различных масштабах по оси давлений путем замены пружин и плунжерных пар. Размеры диаграмм: по оси давлений - до 180 мм; по оси угла поворота коленчатого вала - 360 мм. Точность записи - в пределах 1,5 %.

Устройство индикатора показано на рис. 1.

Индикатор состоит из следующих четырех подсистем, взаимодействующих посредством электрических и пневматических связей:

- 1) приемника давлений 2;
- 2) записывающей части 9,11;
- 3) отметчика верхней мертвой точки (МВТ) 13;
- 4) пульта управления (на схеме не показан).

Муфта непосредственного привода 12 обеспечивает синхронное и синфазное вращение барабана 11, вала электродвигателя и коленчатого вала компрессора.

Отсюда следует, что развертку окружности барабана и установленной на нем бумаги можно рассматривать как равномерную ось угла поворота коленчатого вала компрессора.

Связь индикатора с исследуемым компрессором осуществляется через приемник давления 2, в котором имеются две полости, разделенные гибкой мембраной. Полость "а" соединена с рабочим пространством цилиндра компрессора. В полости "б" может быть установлено любое давление по желанию оператора, так как она соединена с баллоном сжатого воздуха 7. Эта же полость соединена с гидросистемой "в" записывающей части индикатора.

Мембрана приемника давления является чувствительным элементом, который своим перемещением указывает на соотношение давлений сред в обеих полостях. При равенстве давлений мембрана будет занимать нейтральное положение.

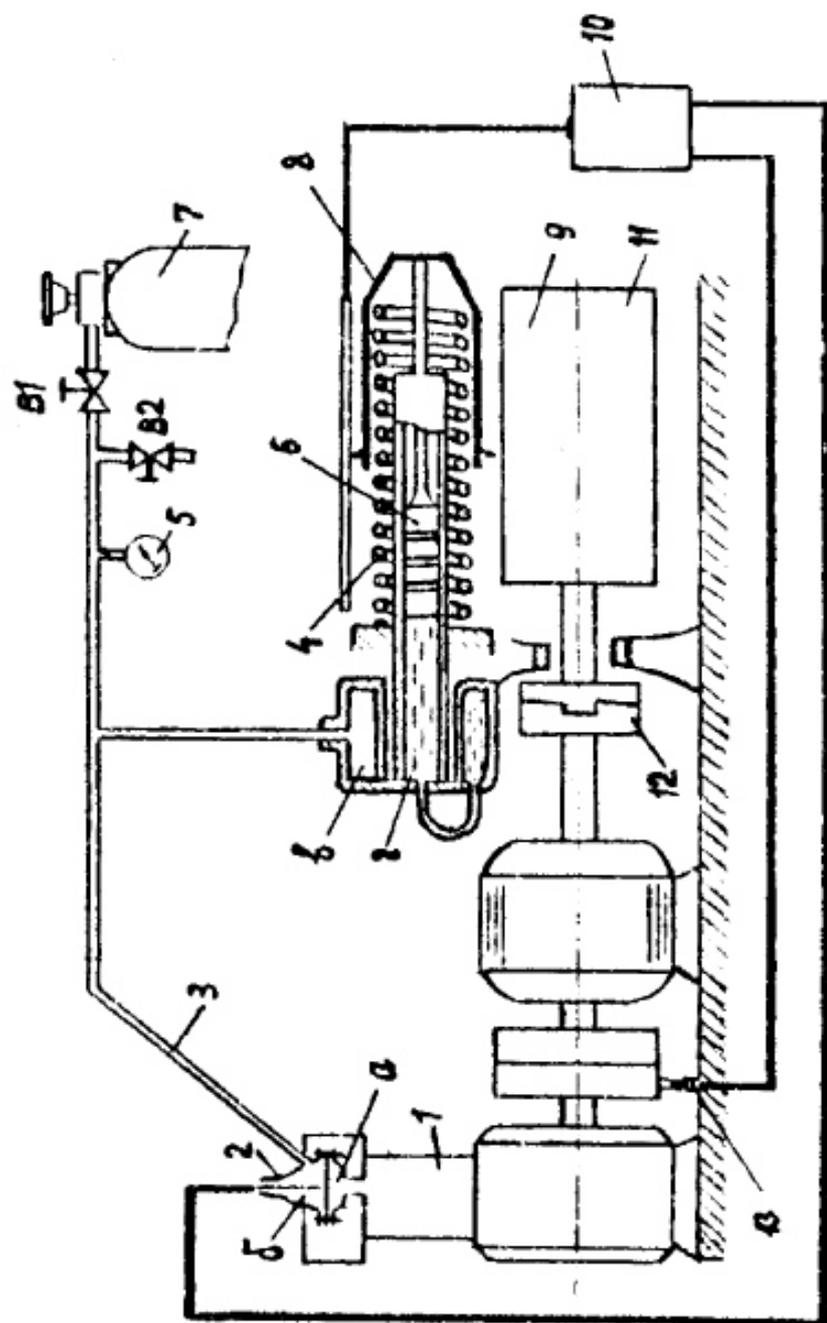


Рис. 1. Устройство индикатора МАИ-2: 1 — исследуемый компрессор; 2 — приемник давления; 3 — пневматическая система; 4 — калиброванная пружина; 5 — манометр; 6 — плунжерная пара; 7 — баллон сжатого газа; 8 — корпус разрядника; 9 — искровой разрядник; 10 — тиратронный преобразователь; 11 — барабан; 12 — муфта; 13 — отметчик верхней мертвой точки

Когда давление газа в пневматической системе будет больше, чем давление пара в цилиндре, мембрана выгнется, и ее центр переместится в сторону цилиндра; при обратном перепаде давлений мембрана выгнется в другую сторону, и её центр переместится в сторону пневматической системы.

Для того чтобы зафиксировать перемещение мембраны в приемнике давления, со стороны пневматической системы установлен контакт. Зазор между мембраной в нейтральном положении и контактом очень мал (0,02-0,03 мм), поэтому при небольшом избытке давления пара в цилиндре (0,02-0,05 кг/см) мембрана будет касаться контакта и замыкать электрическую цепь.

Из сказанного следует, что замыкание или размыкание электрической цепи будет происходить при таком давлении пара в цилиндре, которое превышает давление газа в пневматической системе на величину, необходимую для прогиба мембраны до соприкосновения с контактом. Во многих случаях этим избыточным давлением можно пренебречь и считать, что разрыв или замыкание электрической цепи происходит в моменты равенства давлений в цилиндре и в пневматической системе.

В случае индицирования процессов с очень низкими давлениями эта разность должна быть учтена.

В записывающую часть индикатора, кроме барабана, входит измерительный механизм, представляющий собой пружинно-поршневой манометр, состоящий из следующих основных частей: плунжерной пары 6, калиброванной пружины 4, корпуса искрового разрядника 8.

Работа прибора осуществляется следующим образом. Оператор, подавая сжатый воздух из баллонов через вентиль наполнения В1, устанавливает одинаковые давления в полостях: "б", "в", "г". Полость "г" заполнена специальным маслом и является рабочим пространством плунжерной пары, соединенной с калиброванной пружиной и корпусом искрового разрядника.

Под влиянием давления в полости "г" плунжер передвигается, растягивает пружину и перемещает разрядник вдоль поверхности барабана с индикаторной бумагой. Таким образом, по образующей барабана располагается ось давлений.

Если при каком-то угле поворота коленчатого вала наступит момент равенства давлений в полостях "а" и "б" или давление в полости "б" станет несколько большим, то произойдет разрыв контакта в приемнике давления. В этот момент искровой разрядник будет находиться в определенном положении по отношению к поверхности барабана, соответствующем

давлению в полости "б". Электрический сигнал из приемника давления поступает в тиратронный преобразователь 10 и в виде импульса высокого напряжения (14-18 кВ) подается на искровой разрядник. Между наконечником разрядника и поверхностью барабана образуется искра, которая оставляет точку на поверхности индикаторной бумаги.

Вся диаграмма получается собранной из большого числа точек "замыкание" и "размыкание", каждая из которых принадлежит одному циклу. Такой принцип записи позволяет растягивать процесс индирования по времени, снижать влияние инерционных сил, возникающих в записывающем механизме. Получается "осредненная" по нескольким сотням циклов диаграмма, на которой можно видеть "разброс" давления как по величине, так и по углу поворота коленчатого вала.

Для отметки верхнего или нижнего мертвого положения поршня служит индуктивный отметчик, состоящий из неподвижно закрепленных катушек 13 и ферромагнитного сердечника, закрепленного на маховике (полумуфте) компрессора. Отметчик срабатывает в тот момент, когда мимо магнитопровода катушек проходит сердечник, вращающийся вместе с муфтой. В этот момент в обмотках индуцируется ЭДС, которая усиливается в тиратронном преобразователе и в виде импульса высокого напряжения подается на искровой разрядник.

### 3. ЗАПИСЬ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ

Управление индикатором осуществляется с помощью системы вентилях, тумблеров и переключателей, расположенных на пульте управления.

Конструкция индикатора позволяет записывать одновременно две диаграммы от двух датчиков давления, установленных в отдельных полостях, например в обоих цилиндрах компрессора.

На пульте управления имеются две симметричные группы тумблеров для правого и левого блоков.

В данной работе снимаются индикаторные диаграммы только для одного цилиндра компрессора, и в работу включается только один блок.

Для записи диаграмм применяется специальная электротермическая бумага, предварительно нарезанная по размеру 400x180 мм. Несколько оборотами затяжного валика бумага плотно притягивается к поверхности барабана.

Запись индикаторной диаграммы начинают с нанесения горизонтальных тарировочных линий и отметки мертвой точки. Для этого необходимо:

- открыть кран "в атмосферу";
- переключатель П1 поставить в положение "тарировка" и в течение 5-8 с наносить линию на диаграмму;
- поставить выключатель в положение "ВМТ";
- закрыть кран "в атмосферу" и, открывая кран "давление", постепенно повысить давление в системе, при этом на диаграмме в виде вертикальной линии запишутся отметки верхней мертвой точки. Довести давление в системе до необходимого уровня, поставить переключатель П1 в положение "тарировка" и нанести новую линию. Перевести переключатель в положение "ВМТ". Тарировка производится в рабочем диапазоне давлений с интервалом 1 атм. Перед переключением тумблера П1 в положение "тарировка" необходимо выждать некоторое время, чтобы во всей системе установилось одинаковое давление;
- поставить переключатель в положение "диаграмма".

Запись индикаторной диаграммы следует производить во время понижения давления, приоткрывая вентиль "в атмосферу". Время понижения давления до нуля должно быть не менее 40-60 с.

Регулируя степень открытия вентиля "в атмосферу", необходимо следить за скоростью повышения давления, медленно увеличивая степень

открытия так, чтобы скорость движения стрелки манометра была приблизительно постоянной. Порядок операций следующий:

- в зависимости от записываемого процесса включить тумблеры "замыкание" (сжатие) или "размыкание" (обратное расширение);
- открыть кран "в атмосферу";
- после доведения давления в системе до нуля выключить тумблеры "замыкание" и "размыкание";
- остановить барабан индикатора и убедиться в качественной записи диаграммы.

Перед снятием бумаги с барабана следует провести карандашом по линии крепления кромок листа и тем самым обозначить на оси абсцисс участок, соответствующий полному обороту коленчатого вала, т. е.  $360^\circ$ .

Одновременно с записью индикаторной диаграммы измеряются следующие параметры:

- давление во всасывающем патрубке -  $p_{вс}$ ;
- температура всасываемого пара -  $t_{вс}$ ;
- давление в нагнетательном патрубке -  $p_{наг}$ ;
- температура пара, выходящего из компрессора -  $t_{наг}$ ;
- перепад давлений в расходомерном устройстве;
- мощность, потребляемая из сети по ваттметру -  $N_{эл}$ ;
- атмосферное давление - В.

Результаты измерений указанных выше параметров записывают в правом углу индикаторной диаграммы после ее снятия с барабана.

#### 4. ОБРАБОТКА ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ

Обработка индикаторной диаграммы является наиболее важным и трудоемким этапом лабораторной работы и проводится для достижения следующих целей:

- анализа характера протекания рабочих процессов поршневого компрессора;
- определения численного значения индикаторного коэффициента всасывания;
- определения индикаторной мощности компрессора;
- определения индикаторного коэффициента.

Обработку индикаторной диаграммы начинают с разметки осей координат:  $\varphi$  - угол поворота коленчатого вала и  $p_{изб}$  - избыточное (манометрическое) давление в рабочей полости цилиндра. На рис. 2 интервал по оси  $\varphi$  принят равным  $12^\circ$ , причем разметку начинают от ВМТ вправо, по направлению вращения вала. Горизонтальные линии на диаграмме показывают значение избыточных давлений от нуля до давления нагнетания с интервалом  $1 \text{ кг/см}^2$ . Ориентируясь на точки, оставленные искровым разрядником, проводят наиболее правдоподобную кривую, соответствующую контуру индикаторной диаграммы.

Разметку заканчивают проведением линий нижней мертвой точки (НМТ) и давления всасывания  $p_{вс}$ , определенного по манометру, установленному на всасывающей патрубке компрессора.

Далее проводят свертывание индикаторной диаграммы, т. е. ее построение в координатных осях ход поршня - давление ( $S - p$ ). Для этого используют зависимость хода поршня от угла поворота коленчатого вала в таком виде

$$S = r(1 + \lambda \sin^2 \varphi / 2 - \cos \varphi), \quad (1)$$

где  $r$  - радиус кривошипа,  $r = 0,035 \text{ м}$ ;  $\lambda$  - отношение радиуса кривошипа к длине шатуна,  $\lambda = r/l = 0,035/0,2 = 0,175$ .

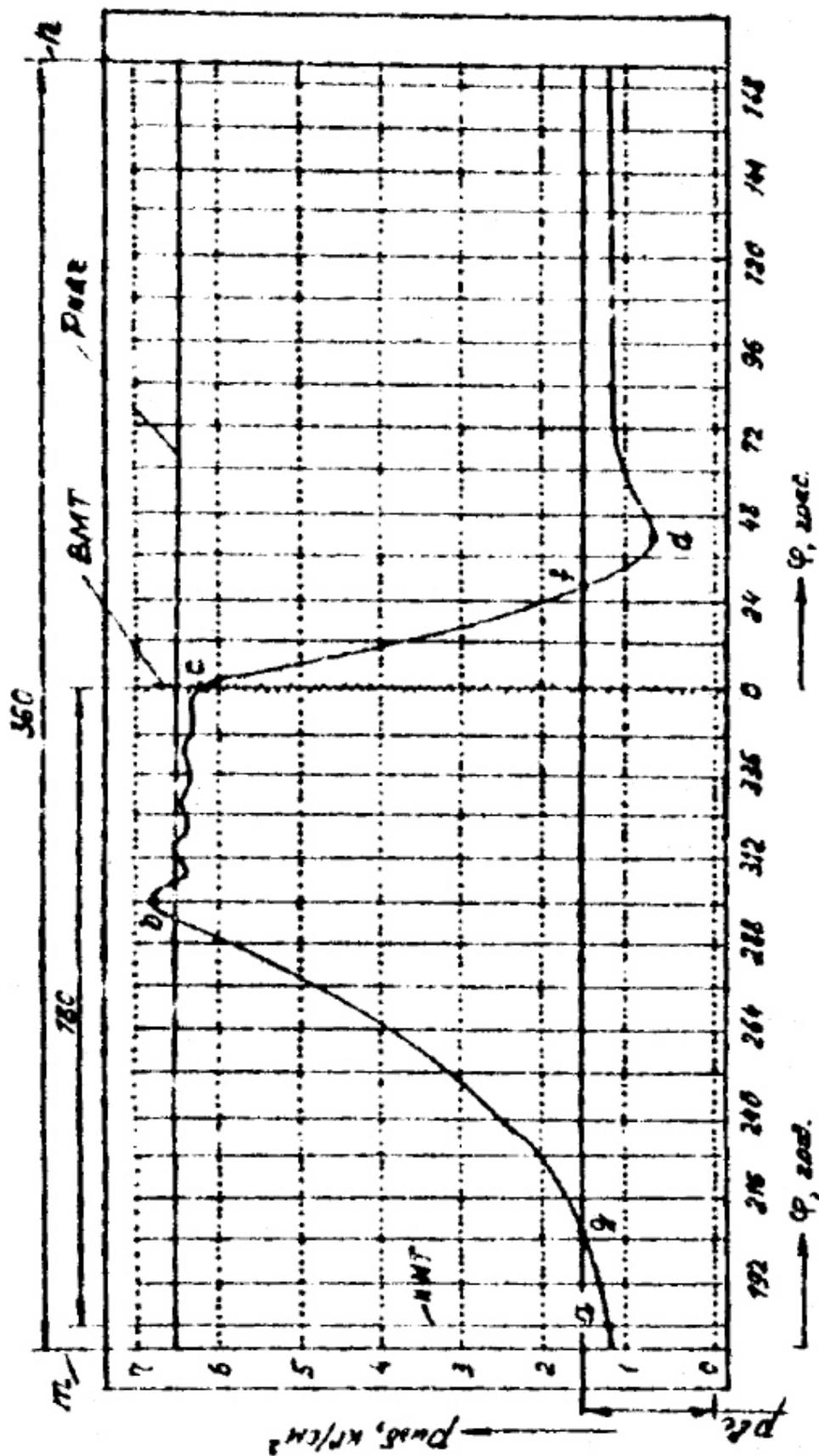


Рис. 2. Разметка индикаторной диаграммы: BMT И HMT – верхняя и нижняя мертвые точки; a – начало процесса сжатия; b – открытие нагнетательного клапана; d – открытие всасывающего клапана

Значения  $S$  в зависимости от  $\varphi$  для данного компрессора приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Зависимость хода поршня от угла поворота**

$\varphi$ , град	$S$ , мм	$\varphi$ , град	$S$ , мм
0	0	186	69,8
6	0,22	192	69,4
12	0,9	198	68,6
18	2,0	204	67,5
24	3,5	210	66,1
30	5,4	216	64,4
36	7,7	222	62,4
42	10,4	228	60,1
48	13,3	234	57,6
54	16,4	240	54,8
60	19,8	246	51,8
66	23,3	252	48,6
72	26,9	258	45,2
78	30,6	264	41,7
84	34,4	270	38,1
90	38,1	276	34,4
96	41,7	282	30,6
102	45,2	288	26,9
108	48,6	294	23,3
114	51,8	300	19,8
120	54,8	306	16,4
126	57,6	312	13,3
132	60,1	318	10,4
138	62,4	324	7,7
144	64,4	330	5,4
150	66,1	336	3,5
156	67,5	342	2,0
162	68,6	348	0,9
168	69,4	354	0,22
174	69,8	360	0
180	70		

Свертывание диаграммы проводят в следующем порядке. Наносят координатную сетку в соответствии с выбранными масштабами по осям  $S$  и  $p$  (рис. 3).

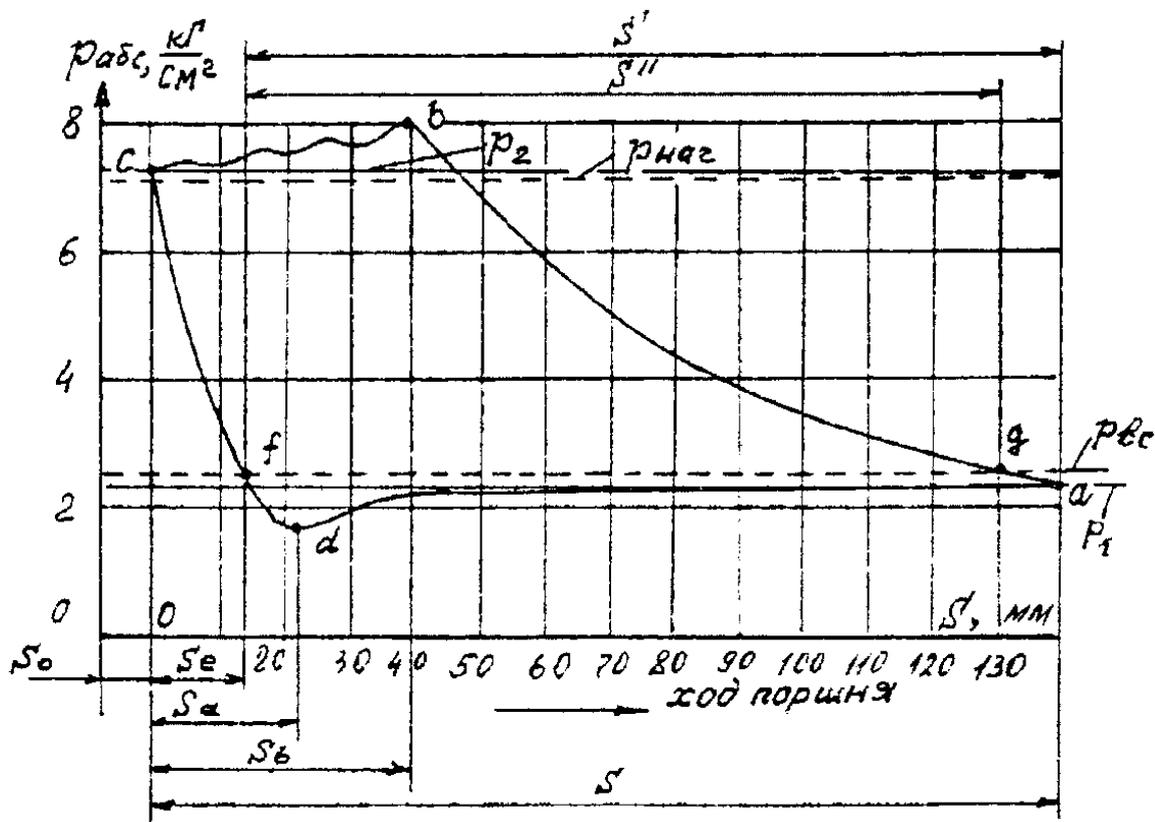


Рис. 3. Построение свернутой индикаторной диаграммы

Удобными для построения и последующей обработки диаграммы являются также значения масштабов

$$m_s = 0,5 \text{ мм хода/мм черт и } m_p = 0,1 \text{ (кг/см}^2\text{)/мм черт.}$$

Далее для характерных точек  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$ , а также для 5-6 промежуточных точек каждого рабочего процесса определяют абсолютные давления и координаты по оси  $S$ . Абсолютные давления определяют из выражения

$$p_{абс} = p_{изб} + B/735,6,$$

где  $p_{абс}$  - абсолютное давление,  $\text{кг/см}^2$ ;  $p_{изб}$  - избыточное давление,  $\text{кг/см}^2$ ;  $B$  - атмосферное давление, мм рт. ст.

Координату  $S$  находят либо по уравнению (1), либо по таблице.

По найденным координатам  $S$  и  $p$  определяют положение точек на координатной сетке и, соединяя их плавной кривой, получают контур свернутой индикаторной диаграммы. Построение заканчивают проведением изобар  $p_{вс}$  и  $p_{наг}$ . Пересечение изобары  $p_{вс}$  контура диаграммы обозначают точками  $f$  и  $g$  (см. рис. 3).

Выполненная подготовительная работа позволяет определить объемные коэффициенты и индикаторную мощность компрессора.

Коэффициент, учитывающий уменьшение производительности от влияния мертвого пространства, определяется отношением [4]

$$\lambda_c = S'/S.$$

Коэффициент дросселирования

$$\lambda_{др} = p_1/p_{вс}.$$

Индикаторный коэффициент всасывания

$$\lambda_i = \lambda_c \cdot \lambda_{др}$$

Для определения коэффициента подачи компрессора необходимо знать коэффициент подогрева – коэффициент скрытых потерь. Он не определяется из индикаторной диаграммы, а рассчитывается по формуле

$$\lambda'_w = T_0/T_k,$$

где  $T_0, T_k$  – температуры кипения и конденсации, соответственно.

Коэффициент подачи компрессора

$$\lambda = \lambda_i \lambda'_w$$

Среднее индикаторное давление определяется из следующего соотношения:

$$p_i = (f_{инд}/S) \cdot m_p,$$

где  $p_i$  – среднее индикаторное давление, кг/см<sup>2</sup>;  $f_{инд}$  – площадь индикаторной диаграммы, мм<sup>2</sup>;  $S$  – ход поршня в масштабе диаграммы, мм;  $m_p$  – масштаб по оси давлений, (кг/см)/мм черт.

Индикаторная мощность компрессора определяется так:

$$N_i = 98p_i V_T,$$

где  $N_i$  - индикаторная мощность, кВт;  $V_T$  - теоретическая объемная производительность компрессора, м<sup>3</sup>/с.

Величина  $V_{Tm}$  определяется из выражения

$$V_T = (\pi D^2/4)szn,$$

где  $D = 82$  мм;  $s = 70$  мм;  $z = 2$ ;  $n = 16$  с<sup>-1</sup>.

Рассмотрим пример на рис. 3. Здесь приняты следующие значения масштабов:  $m_s = 0,6$  мм хода/мм черт и  $m_p = 0,1$  (кг/см<sup>2</sup>)/мм черт. Рассчитываем коэффициенты  $\lambda_c$ ,  $\lambda_{dp}$  и  $\lambda_i$ :

$$\lambda_c = S'/S = 126/140 = 0,9;$$

$$\lambda_{dp} = p_1/p_{bc} = 2,35/2,6 = 0,904;$$

$$\lambda_i = \lambda_c \lambda_{dp} = 0,9 \cdot 0,904 = 0,81.$$

Площадь диаграммы получаем как сумму площадей упрощенных фигур - четырехугольников, треугольников и трапеций: тогда

$$f_{ин} = 3911 \text{ мм}^2.$$

Среднее индикаторное давление  $p_i = (f_{ин}/S)m_p = (3911/140) \cdot 0,1 = 2,79$  кг/см<sup>2</sup>.

Эта же величина в СИ

$$p_i = 98 \cdot 2,79 = 273,8 \text{ кПа}.$$

Индикаторная мощность

$$N_i = p_i \cdot V_T = 273,8 \cdot 0,01183 = 3,24 \text{ кВт}.$$

Мощность изоэнтропного сжатия

$$N_s = \frac{\lambda \cdot V_T}{v_1} \cdot l_s.$$

где  $l_s$  и  $v_1$  - удельная работа изоэнтропного сжатия и удельный объем пара хладагента на всасывании в компрессор (определение  $l_s$  и  $v_1$  приведено в [2]).

Индикаторный КПД компрессора

$$\eta_i = N_s / N_i$$

## 5. РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ХОЛОДИЛЬНОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

Методика расчетного определения коэффициента подачи, мощности и индикаторного КПД холодильного поршневого компрессора, дана в [2].

Программа определения этих показателей на алгоритмическом языке программирования Fortran приведена в Приложении 1.

Вызов подпрограмм для расчета термодинамических параметров рабочего вещества производится оператором CALL RIJ, где RIJ – имя рабочего вещества: R12.

В программе, приведенной в приложении 1, отсутствует блок расчета коэффициента подачи, мощности и индикаторного КПД холодильного поршневого компрессора, который студент должен составить самостоятельно, используя алгоритм, приведенный в [2], и подпрограммы этого приложения.

Исходными данными для расчета являются: теоретическая объемная производительность компрессора  $V_T$  (VT)\*; давление всасывания  $p_{вс}$  (PB); давление нагнетания  $p_{наг}$  (PH); температура пара на всасывании  $t_{вс}$  (TB).

В результате расчета определяются: коэффициент подачи  $\lambda$  (LAMBDA); индикаторный КПД  $\eta_i$  (ETA I).

Последовательность расчета состоит в определении:

- температуры кипения;
- давления всасывания;
- температуры конденсации;
- давления нагнетания;
- плотности пара на всасывании в компрессор;
- энтальпии пара на всасывании в компрессор;
- энтропии пара на всасывании в компрессор;
- энтальпии конца изоэнтропного сжатия пара в компрессоре;
- удельной работы изоэнтропного сжатия пара в компрессоре;
- изоэнтропной мощности компрессора;
- коэффициента подачи;
- индикаторной мощности компрессора;
- индикаторного КПД.

-----

\* Рядом с обозначением в скобках здесь и далее записан идентификатор, определяющий эту величину в программе расчета компрессора на ЭВМ.

Список подпрограмм для теплового расчета термодинамических свойств хладагента приведен в таблице 2.

Таблица 2

Обозначение подпрограммы	Назначение подпрограммы
THAC (P,T)	Определение температуры насыщения T по давлению P
PL (TP, PP, ROP)	Определение плотности пара ROP по температуре TP и давлению PP
IROT(ROI, TI, E)	Определение энтальпии пара E по плотности ROI и температуре TI
SROT(ROS, TS, S)	Определение энтропии пара S по плотности ROS и температуре TS
SAD(T, P1, P2, T, E)	Определение температуры T и энтальпии E конца изоэнтропного сжатия по температуре T и давлению всасывания P1 и давлению нагнетания P2

Единицы измерения:

давление – Бар= $10^5$  Па;  
 температура – К;  
 плотность – кг/дм<sup>3</sup>;  
 энтальпия – кДж/кг;  
 энтропия – кДж/(кг К).

После определения коэффициента подачи и индикаторного КПД производится сравнение расчетных и экспериментальных данных.

## 6. ОТЧЕТ О РАБОТЕ

По данной лабораторной работе оформляется индивидуальный отчет, который должен содержать следующие материалы:

- описание объекта исследования и формулировку целей испытания;
- описание работы индикатора МАИ-2;
- полученные прибором индикаторные диаграммы и их обработку;
- расчетные значения параметров работы компрессора;
- сравнение расчетных и экспериментальных данных;
- анализ полученных результатов.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Приложение 1

Программа расчета объемных и энергетических показателей работы холодильного поршневого компрессора

```
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
REAL*8 LAMBDA
OPEN(5,FILE='IN.DAT')
OPEN(6,FILE='OFF.DAT')
CALL R12
C
C          Ввод исходных данных
C
C      VT– теоретическая объемная производительность, м3/с
C      PB – давление на всасывании – Бар;
C      PH— давление на нагнетании – Бар;
C      TB – температура на всасывании – °С;
C
C      READ (5,*) VT, PB, PH, TB
*****
C          Блок расчета коэффициента подачи и индикаторного коэффициента
C          компрессора
C          *****
C          Вывод результатов расчета
C      LFMBDA– коэффициент подачи;
C      ETAI – индикаторный коэффициент.
WRITE(6,100) LFMBDA, ETAI
100 FORMAT(2X,' LFMBDA=',F5.3,2X,' , ETAI =', F5.3
STOP
END

C ***** ПОДПРОГРАММЫ *****
SUBROUTINE PHAC (T,P)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
COMMON /A/TKP1,R,ROKP1
COMMON /B/RI,PA,E(5),PKP
TAY=T/TKP1
BB=RI-4.+PA
A=0.
DO 1 I=1,5
A=A+E(I)*BB*TAY**(I-2)
1 CONTINUE
P=EXP(ALOG(PKP)+(RI-5.3*BB)*ALOG(TAY)+A)
RETURN
END
C
```

**SUBROUTINE THAC (P,T)**

**C**  
**IMPLICIT REAL\*8(A-H,O-Z)**  
**COMMON/A/TKP1,R,ROKPI**  
**T=TKP1**  
**DT=50.**  
**1 T1=T/TKP1**  
**CALL PHAC(T,P1)**  
**IF(ABS(P1-P)/P1.LT.0.0001) GOTO2**  
**IF(P1-P.GT.0) GOTO3**  
**T=T+DT**  
**DT=DT/5.**  
**T=T-DT**  
**GOTO1**  
**3 T=T-DT**  
**GOTO1**  
**2 CONTINUE**  
**RETURN**  
**END**

**C**  
**SUBROUTINE PL (TP,PP,ROP)**  
**IMPLICIT REAL\*8(A-H,O-Z)**  
**COMMON/A/TKP1,R,ROKPI**  
**ZP=1**  
**2 ROP=PP/(10.\*R\*ZP\*TP)**  
**ZO=ZP**  
**CALL PF(ROP,TP,ZP,PP1)**  
**IF(ABS(ZO-ZP).GT.0.000001) GO TO 2**  
**RETURN**  
**END**

**C**  
**SUBROUTINE PF (ROP,TP,Z,P1)**  
**IMPLICIT REAL\*8(A-H,O-Z)**  
**COMMON/A/TKP1,R,ROKPI**  
**EXTERNAL KDABL**  
**CALL P(KDABL,ROP,TP,P2)**  
**Z=P2**  
**P1=10.\*P2\*TP\*ROP\*R**  
**RETURN**  
**END**

**C**  
**SUBROUTINE P (K,RO,T,P2)**  
**IMPLICIT REAL\*8(A-H,O-Z)**  
**COMMON /A/TKP1,R,ROKPI**  
**\* /E/B(10,10)**  
**\* /O/M,N**  
**EXTERNAL K**  
**DO 7 I=1,N**

```

      DO 7 J=1,M
7 CONTINUE
  TKP=TKP1
  P1=0.
  M1=M+1
  DO2 I=1,N
  DO2 J=1,M1
  J1=J-1
  CALL K(I,J1,X)
  P1=P1+X*B(I,J)*(RO**I)/((T/TKP)**(J-1))
2 CONTINUE
  P2=1.+P1
  RETURN
  END
C
SUBROUTINE KDABL (I,J,DB)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IP=I
JP=J
DB=1.
RETURN
END
C
SUBROUTINE IROT (ROI,TI,EI)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
EXTERNAL KENTAL
COMMON/A/TKP1,R,ROKP1
* /D/D(10),CONSTS,CONSTI
* /O/M,N
AE2=0.
DO1 I=1,N
AE2=AE2+D(I+1)*((TI/TKP1)**(I+1))/(I+1)
1 CONTINUE
CALL P(KENTAL,ROI,TI,P1)
AE1=P1
EI=R*TI*AE1+TKP1*D(1)*(TI/TKP1)+TKP1*AE2+CONSTI
RETURN
END
C
SUBROUTINE KENTAL (I,J,EN)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
A=J
EN=(I+A)/I
RETURN
END
C

```

```

SUBROUTINE SROT (ROS,TS,S)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
EXTERNAL KENTPO
COMMON/A/TKP1,R,ROKP1
* /D/D(10),CONSTS,CONSTI
* /O/M,N
AS2=0.
DO3 I=1,N
AS2=AS2+D(I+1)*((TS/TKP1)**I)/I
3 CONTINUE
CALL P(KENTPO,ROS,TS,P1)
AS1=P1
S=-R*(ALOG(ROS)+1.-AS1)+D(1)*ALOG(TS/TKP1)+AS2+CONSTS
RETURN
END

```

C

```

SUBROUTINE KENTPO (I,J,ENT)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
A=I
ENT=(J-1)/A
RETURN
END

```

C

```

SUBROUTINE SAD (T,P1,P2,T2,E2)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
COMMON/A/TKP1,R,ROKP1
CALL PL(T,P1,R1)
CALL SROT(R1,T,S1)
CALL THAC(P2,TH)
DT=5.
TT=TH-DT
1 TT=TT+DT
CALL PL(TT,P2,R2)
CALL SROT(R2,TT,S2)
IF(ABS(S2-S1).LT.0.00001) GOTO 2
IF(S2.LT.S1) GO TO 1
TT=TT-DT
DT=DT/2.
GO TO 1
2 CONTINUE
TTA=TT
CALL IROT(R2,TTA,E2)
V=1./R2
T2=TTA-273.15
RETURN
END

```

C

\*\*\*\*\*

C ПОДПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
C КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА  
C ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ R12

C\*\*\*\*\*

C

SUBROUTINE R12

IMPLICIT REAL\*8(A-H,O-Z)

COMMON/A/TKP1,R,ROKP1

\* /B/RI,PA,E(5),PKP

\* /C/A1,A2,G(4)

\* /D/D(10),CONSTS,CONSTI

\* /E/B(10,10)

\* /O/M,N

DIMENSION B1(8,4),D1(6),E1(5),G1(5)

DATA B1/4.1888369,-9.66065502,18.2867729,-.429799498,0.,5.25692699

\*,0.,0.933965444,-11.4858003,21.9447268,-41.665652,.156717599,0.,

\*-6.40921321,0.,0.,8.6472583,-10.8438817,23.9101184,0.,0.,0.,0.,

\*0.,-3.51695112,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0./

DATA D1/.0774432,0.707146,.0919702,-.513222,.302382,-.0576614 /

DATA E1/-4.,3.3,.3,.2,.2/,G1/-.7,.3,.2,.2,0./

DO 5 I=1,10

DO 5 J=1,10

B(J,I)=0.

5 CONTINUE

DO 7 I=1,10

7 D(I)=0.

DO 1 I=1,4

DO 1 J=1,8

B(J,I)=B1(J,I)

1 CONTINUE

DO 2 I=1,6

2 D(I)=D1(I)

DO 3 I=1,5

E(I)=E1(I)

3 G(I)=G1(I)

PA=-0.0913

RI=6.5741

PKP=41.19

A1=1.4388

A2=0.2338

TKP1=385.15

R=0.0687563

ROKP1=0.5791

M=4

N=8

CONSTI=0.

```
CONSTS=0.  
T=273.15  
RO=0.01796  
CALL IROT(RO,T,EE)  
CONSTI=552.06-EE  
CALL SROT(RO,T,S)  
CONSTS=4.5566904-S  
RETURN  
END
```

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новицкий П.В. Электрические измерения неэлектрических величин. -Л.: Энергия, 1975. -576 с.
2. Носков А.Н. Экспериментальное исследование холодильного поршневого компрессора: учеб.-метод. пособие — Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2018. — 41 с.
3. Холодильные компрессоры / А.В. Быков, Э.М. Бежанишвили, И.М. Калнинь и др. / Под ред. А.В. Быкова. -М.: Колос, 1992. -304 с.
4. Холодильные машины: Учебник для вузов/ А.В. Бараненко [и др.], под. Общ. Ред. Тимофеевского Л.С. СПб.: Политехника. 2006. 944 с.
5. [http://www.infrost.com.ua/bitzer\\_w4pa.html](http://www.infrost.com.ua/bitzer_w4pa.html)

Носков Анатолий Николаевич

**Исследование рабочих процессов холодильного  
поршневого компрессора**

**Учебно-методическое пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А