

## W-термоэммиттер в экспериментах с жидким гелием

Версия 2014.12

**Задача.** Исследовать явления, происходящие при нагреве вольфрамовой нити до температуры ее свечения в гелиевом криостате. Изучить влияние различных механизмов теплоотвода от нити в вакууме, газе и жидком гелии при температурах ниже и выше  $\lambda$ -точки. Измерить ток термоэлектронной эмиссии и сравнить его с расчетом по формуле Ричардсона-Дэшмана.

- измерить при малых токах температурную зависимость сопротивления вольфрама в диапазоне температур 1.3–300 К;
- измерить воль-амперную характеристику нити (вплоть до токов свечения), находящейся в различных условиях:
  - а) в атмосфере гелия при комнатной температуре;
  - б) в насыщенных парах над жидким гелием при 4.2 К;
  - в) в насыщенных парах над жидким гелием при 1.2 К;
  - г) непосредственно в жидком гелии при температуре 4.2 К;
  - д) непосредственно в жидком гелии ниже его  $\lambda$ -точки.
  - е) в неэкранированной заводской колбе (что внутри, газ или вакуум?);
- Для каждого из случаев определить основные механизмы теплоотвода и сравнить экспериментальные данные с теоретическим расчетом.
- Для случаев б) и в) получить термоэмиссионный ток и сравнить его с расчетом по формуле Ричардсона-Дэшмана. (Доп. задача)
- Напустить электроны на поверхность жидкого гелия и наблюдать этот эффект по прогибу поверхности. Оценить максимальную плотность поверхностных электронов, полученную в эксперименте. (Опционально)

**Ключевые слова:** теплопроводность газов, теплопроводность жидкого гелия, закон Видемана-Франца, тепловое излучение тел, закон Стефана-Больцмана, формула Ричардсона-Дэшмана, 2D электроны над гелием.

### Литература

- Д.В. Сивухин *Общий курс физики: термодинамика и молекулярная физика*, М.: Физматлит, 2006.
- I.F. Silvera, J. Tempere, *Electron Emission in Superfluid and Low Temperature Vapor Phase Helium* Phys.Rev.Lett. **100**, 117602 (2008).
- J. Fang, A.E. Dementyev, J. Tempere<sup>1</sup>, I.F. Silvera *Thermionic emission and a novel electron collector in a liquid helium environment*, Rev.Sci.Inst. **80**, 043901 (2009).
- В.С. Эдельман, *Левитирующие электроны УФН* **130** 675-706 (1980) .

**Дополнительная подготовка:** Выполнить следующие учебные задания:

- программирование на LabVIEW: управление и сбор данных в эксперименте;
- О записи результатов измерений в файл данных;
- обсчет результатов с помощью пакета GnuPlot;

- написание отчета на языке LaTeX;

## Методические указания, необходимые для работы.

- Измерение температуры в диапазоне 1.2–300 К;
- Инструктаж и обучение работе с жидким гелием.

# 1 Общий порядок работы

По мере выполнения работы необходимо ежедневно, по графику занятий, вести записи в лабораторном журнале. Каждая дневная запись должна начинаться с даты и краткого плана работы на день, а оканчиваться записью о результатах дня. Не забывайте записывать данные и зарисовывать схемы, которые будут полезны при обработке измерений и оформлении результатов.

## 1.1 Пройти инструктаж по технике безопасности при работе:

- со сжиженными газами;
- со стеклом; **Работая с дьюарами, надевайте защитные очки!**
- с электроприборами;
- по пайке;
- с хим. реактивами;

## 1.2 Подготовка эксперимента.

- Ознакомьтесь с оборудованием и приборами рабочего места Практикума. Нарисуйте в рабочем журнале схему газовых коммуникаций вашей установки. К каждой установке подведены три внешние линии газовых коммуникаций: *гелиевая сеть, форвакуумная откачка и откачка паров гелия.*

*Гелиевая сеть* служит для возврата испарившегося гелия в газгольдер гелиевой мастерской для повторного его ожижения. Чтобы предотвратить натекание воздуха в гелиевую сеть, давление в ней слегка (1%) превышает атмосферное.

**Не допускайте случайного вытекания гелия из гелиевой сети!**

*Форвакуумная откачка* используется для проверки герметичности установки и для удаления воздуха перед заполнением ее гелием (из *гелиевой сети*) в начале эксперимента. Линия *форвакуумной откачки* ведет к механическому насосу (2-5 л/сек), установленному в подвале под помещением Практикума. Выхлоп от насоса выводится в трубу, второй открытый конец которой находится снаружи здания.

**После выключения форвакуумного насоса в него необходимо напустить воздух, иначе масло из насоса постепенно вылезет из него в трубу линии *форвакуумной откачки*!**

*Линия откачки паров гелия* ведет к высокопроизводительному гелиевому насосу (20 л/сек), расположенному в подвале под помещением Практикума. Выхлоп насоса производится в линию *гелиевой сети*.

#### **Внимание!**

Необдуманное включение насоса откачки паров гелия может привести к закачке воздуха в газгольдер гелиевого ожижителя!

При выключении гелиевого насоса автоматически открывается установленный на нем клапан напуска гелия из линии *гелиевой сети*. При этом, в линию *откачки паров гелия* поступает поток газообразного гелия с плотным туманом из мелких капелек вакуумного масла из насоса. Поэтому, перед выключением насоса обязательно переключите линию откачки паров гелия.

#### **Внимание!**

Холодный криостат, даже когда жидкий гелий уже испарился, может взорваться при отогреве, если давление в нем превысит атмосферное более чем на 50–100 Торр. Не оставляйте его без присмотра при закрытых вентиллях к *гелиевой сети* и линии *откачки паров гелия*!

- Придумайте и нарисуйте в рабочем журнале схему измерений с учетом имеющихся на рабочем месте измерительных приборов: мультиметра Keithley2000 (с мультиплексором на 10 каналов) и функционального генератора Agilent 33220a. Последний мы будем использовать в качестве источника регулируемого постоянного напряжения (режим (DC offset)).

#### **Особенности генератора Agilent 33220a**

1. Учтите, что выход генератора заземлен. 2. Амплитуда сигнала генератора завистит от величины нагрузки. Поэтому, чтобы знать точное значение выдаваемого им тока, нужно поставить в вашу схему дополнительный реперный резистор и измерять мультиметром напряжение на нем.

Для сборки измерительной схемы можно использовать готовую распаечную коробку, оснащенную всеми необходимыми разъемами для подключения стандартных кабелей (с разъемами RCA, BNC, D-SUB ) к приборам и криостату.

- Смонтируйте тоководы от холодной зоны криостата к многоштырьковому разъему на его капке, обеспечивая герметичность электропроводов в криостат.

Для тоководов можно использовать медные (ПЭШО) или манганиновые (ПЭШОММ) эмалированные провода в шелковой изоляции. Полезно скрутить провода попарно.

- Оцените по табличным данным ожидаемую величину сопротивления образцов и подводящих тоководов как при комнатной температуре, так и в жидком гелии. Это позволит выбрать оптимальную величину реперного резистора и обосновать выбор между двух- и четырех-проводной схемами измерений. Не забудьте отразить это в рабочем журнале.

### Выбор четырехпроводной схемы

Для тоководов к образцу, расположенному в холодной зоне криостата, используют тонкие провода с малой теплопроводностью и, следовательно, с заметным сопротивлением. Если пренебречь этим сопротивлением нельзя, то нужно использовать четырехпроводную схему, в которой измерительный ток подводится к образцу по одной паре проводов, а падение напряжения на образце измеряют при помощи другой пары.

- Соберите и проверьте схему измерений используя цифровой мультиметр Appa-109N. Проведите работоспособность собранной схемы в ручном режиме. Подайте небольшое постоянное напряжение от генератора Agilent-33220A (далее Ag33220) и измерьте мультиметром Keithley-2000 (далее Ke2000) напряжение на образце. Сравните полученное значение с ожидаемой величиной.
- Оцените, используя табличные данные, минимальный ток через образец, при котором омический нагрев образца был бы несущественен, по сравнению с теплом, поступающим к образцу по подводящим проводам. Учтите, что при гелиевых температурах сопротивление металла может существенно упасть. Достаточно ли будет эта величина тока для уверенной регистрации напряжения на образце мультиметром? Проверьте это в ручном режиме при комнатной температуре на налаженной вами схеме. Не забудьте отразить результат в рабочем журнале.

## 2 Приготовление образцов

### 2.1 Стандартная лампа в качестве заготовки для образца

- Для приготовления образцов мы используем стандартные миниатюрные лампочки накаливания типа Н35-01501, рассчитанные на работу в нормальных условиях при напряжении питания 1.5В. Мощность лампы 0.15Вт, ток 100 мА.
- Вскройте лампу напротив нити накаливания царапнув лампу стеклорезом и подогрев царапину жалом паяльника.

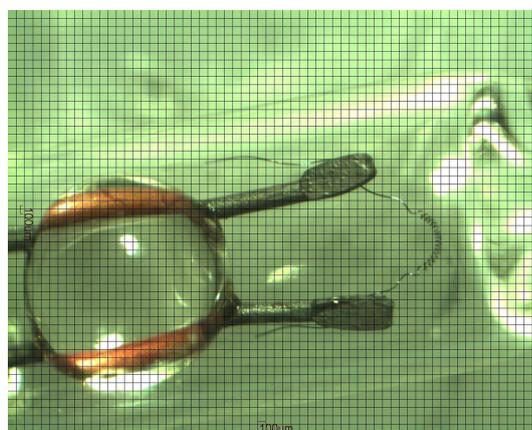
Альтернативный способ вскрытия лампы, – спилить ее стеклянный кончик на наждачной бумаге. При этом вольфрамовая нить накала оказывается заключенной в камеру с маленьким выходным отверстием, что может кардинально изменить условия теплоотвода при работе лампы в жидком гелии.

Кстати, в этом случае мы получаем аналог «бульбочки» П.Л. Капицы, подходящую для создания направленной струи свертекучего гелия в экспериментах подобных тем, которые он проводил при открытии свертекучести.

Лампа Н35-01501



1.5 В, 0.1 А, 0.15 Вт



Лампочка с вскрытой колбой. Период мелкой сетки 100 мкм

### 2.2 Соображения о балансе количества и качества

Для эксперимента хорошо бы смонтировать в криостате три лампочки: вскрытую рабочую, вскрытую запасную и одну невскрытую контрольную. Вряд ли целесообразно включать их последовательно или в параллель. Т.е.к каждой лампочке придется подводить по 2 измерительных и 2 токовых провода. Оцените, какова при этом будет теплопередача по подводящим проводам и какова будет скорость испарения жидкого гелия (в см<sup>3</sup>/сек) при зажженной в нем лампочке.

## 2.3 Справочные данные: свойства вольфрама.

Свойства отрезка (длиной 1 см и диаметром 1 см)  
бесконечной вольфрамовой нити.

(Справочник под ред. Григорьева, Мейлихова, 1991)

Нить бесконечна в смысле отсутствия продольного теплоотвода. При пересчете к диаметру  $d$ (см):  $R$  делится на  $d^2$ ,  $W$  умножается на  $d$ ,  $U$  делится на  $\sqrt{d}$ ,  $I$  умножается на  $\sqrt{d^3}$

Температура	Сопротивление	Мощность накала	Падение напряжения	Ток	Ток эмиссии
$T, K$	$R, \text{мкОм}$	$W, \text{Вт}$	$U, \text{мВ}$	$I, A$	$I_e, A/\text{см}^2$
273	6.38				
293	6.99				
300	7.2				
400	10.26	0.0062	0.253	24.67	
500	13.45	0.0305	0.64	47.62	
600	16.85	0.0954	1.268	75.25	
700	20.49	0.240	2.218	108.2	
800	24.19	0.530	3.581	148.0	
900	27.94	1.041	5.393	193.1	
1000	31.74	1.891	7.749	244.1	$3.36e - 15$
1100	35.58	3.223	10.71	301.0	$4.77e - 13$
1200	39.46	5.210	14.34	363.4	$3.06e - 11$
1300	43.40	8.060	18.70	430.9	$1.01e - 9$
1400	47.37	12.01	23.85	503.5	$2.08e - 8$
1500	51.40	17.33	29.85	580.6	$2.87e - 7$
1600	55.46	24.32	36.73	662.2	$2.91e - 6$
1700	59.58	33.28	44.52	747.3	$2.22e - 5$
1800	63.74	44.54	53.28	836.0	$1.4e - 4$
1900	67.94	58.45	63.02	927.4	$7.15e - 4$
2000	72.19	75.37	73.75	1022	$3.15e - 3$
2100	76.49	95.69	85.57	1119	$1.23e - 2$
2200	80.83	119.8	98.40	1217	$4.17e - 2$
2300	85.22	148.2	112.4	1310	$1.28e - 1$
2400	89.65	181.2	127.5	1422	0.364
2500	94.13	219.3	143.6	1526	0.935
2600	98.66	263.0	161.1	1632	2.25
2700	103.22	312.7	179.7	1741	5.12
2800	107.85	368.9	199.5	1849	11.11
2900	112.51	432.4	220.6	1961	22.95
3000	117.24	503.5	243.0	2072	44.4
3100	121.95	583.0	266.7	2187	83.0
3200	126.76	671.5	291.7	2301	150.2
3300	131.60	769.7	318.3	2418	265.2
3400	136.49	878.3	346.2	2537	446.0
3500	141.42	998.0	375.7	2657	732.0
3600	146.40	1130	406.7	2777	1173
3655	149.15	1202	423.4	2838	1505

### 3 Автоматизация процесса измерений

- Ознакомьтесь с *Методическими указаниями* «О записи результатов измерений в файл данных».
- Обдумайте структуру программы измерений и нарисуйте в лабораторном журнале ее блок схему.
- Напишите на языке LabVIEW программу для проведения измерений.
- Протестируйте работу программы, подключив к измерительной схеме резистор, соответствующий по порядку величины ожидаемому сопротивлению образцов. Проверьте, что содержимое создаваемых в результате работы программы файлов данных удовлетворяет требованиям *Методических указаний*.

## Примерная структура программы измерений

### Начальные установки

При запуске программы производим инициализацию приборов с привязкой по их GPIB и/или USB адресам и устанавливаем их в рабочий режим. Присваиваем начальные значения параметрам (абсолютного времени начала измерений, величина измерительного тока) и включаем ток. Создаем текстовый файл с уникальным именем для записи результатов измерений.



### Основной цикл измерений, проводимых в процессе охлаждения и отогрева измерительной ячейки криостата

В основном цикле мы измеряем и записываем в файл данных:

- время в секундах (от начала цикла, с точностью до 10 мсек),
- сигнал с датчика ®Varatron в вольтах),
- напряжение на реперном резисторе, в Вольтах),
- напряжения на каждом из образцов. При этом предполагается, что все образцы соединены последовательно и через них проходит общий ток. В случае, когда по условиям опыта последовательное соединение образцов нежелательно, коммутацию токов через образцы придется производить вручную.

При переключении измерительных каналов мультиметра необходимо учитывать время переходных процессов замыкания/размыкания реле, которое не превышает 100 мс.

Графическое построение временной и температурной зависимостей средствами LabVIEW может быть полезной для контроля хода эксперимента.

### Дополнительный цикл измерений

Этот цикл предназначен для измерения вольт-амперных характеристик образцов в характерных точках температурного интервала, в которых условия теплоотвода могут сильно изменяться (в жидком гелии ниже и выше  $\lambda$ -точки, в газообразном холодном гелии, в атмосфере при нормальных условиях). Для изменения тока мы, за каждый проход цикла, добавляем приращение  $\Delta U_0$  к текущему значению напряжения, генератора Ag33220 и устанавливаем условия смены знака этого приращения при достижении предельного значения  $U_0^{\max}$ . В течение цикла величина  $U_0$  должна пробегать значения  $0 \rightarrow U_0^{\max} \rightarrow 0 \rightarrow -U_0^{\max} \rightarrow 0$  после чего следует обеспечить выход из цикла и восстановить первоначальное значение  $U_0$ . Запуск цикла можно инициировать вручную или задать условия его включения в виде температурного или временного интервала. Визуализация вольт-амперной характеристики средствами LabVIEW может быть полезной для контроля хода эксперимента.



### Завершение программы

Выключаем измерительный ток на Ag33220. Завершаем работу с приборами. Закрываем дескриптор файла записи данных.

## 4 Проведение измерений в диапазоне температур 4.2-300 К.

- Проверьте работоспособность газового термометра.
- Проверьте работоспособность схемы измерений .
- – установите гелиевый дьюар. **Работая с дьюарами надевайте защитные очки!**
- Произведите откачку криостата форвакуумным насосом. Затем, закрыв линию откачки, напустите в криостат гелий из гелиевой сети и закройте кран. В процессе охлаждения, давление газообразного гелия в криостате можно контролировать по положению стрелки механического вакуумметра. Таким образом можно оценить скорость охлаждения криостата и правильно выбрать время, когда в него можно будет заливать жидкий гелий.
- Установите азотный дьюар и залейте в него жидкий азот.

Охлаждение криостата жидким азотом в условиях, когда гелиевый дьюар открыт на воздух, приведет к намерзанию воды и кислорода из воздуха в криостате. Заливайте жидкий азот только при откаченном или заполненном гелием криостате!

- Теперь, пока криостат медленно остывает, можно запустить программу и начать измерения.
- Заливку гелия можно начинать, когда температура в криостате опустится ниже 100К. Обычно это происходит за 40 минут и определяется качеством гелиевого дьюара.

Межколбовое пространство азотного дьюара должно быть откачено до хорошего вакуума. В гелиевом же дьюаре должно находиться небольшое количество теплообменного газа, который сначала обеспечивает теплоотток от внутренних частей криостата к азотному дьюару, а затем вымерзает, восстанавливая теплоизоляцию. В качестве теплообменного газа обычно используют водород или неон при давлении  $\sim 10$  Торр.

- Произведите заливку гелия. Не работайте в одиночку, по крайней мере, пока не наберетесь опыта. Процесс штатной заливки в стандартный  $\varnothing 60$  мм гелиевый дьюар занимает 1-2 минуты. Для первого раза залейте немного гелия, – лишь бы он прикрывал камеру с образцом.

В процессе заливки температура образца может сильно отличаться от температуры колбы газового термометра. Поэтому на этом этапе, в диапазоне температур от  $\sim 100$ -4.2 К измерения проводить не удастся.

- После получасового установления теплового режима криостата с комнатой

запишите величину сигнала с Varatron'a, она понадобится для калибровки газового термометра.

- Проведите измерения в диапазоне температур от  $\sim 100-4.2$  К. Используя конструктивные возможности криостата, аккуратно поднимите вставку так, чтобы смонтированный на колбе газового термометра образец оказался на высоте  $\sim 5$  см, над поверхностью гелия. Для этого придется временно ослабить латунную уплотнительную гайку на капролоновой капке криостата.
- Производите измерения до тех пор, пока жидкий гелий в криостате не испарится. Когда температура образца поднимется до  $\sim 70$  К, можно аккуратно снять азотный дьюар и продолжить измерения до полного отогрева.

Оставшийся в снятом с установки дьюаре жидкий азот стоит слить в азотную рубашку транспортного гелиевого дьюара.

Не проводите операцию по снятию дьюара с азотом в одиночку.  
Не выливайте жидкий азот на пол или в раковину! Они этого не выдержат!

По окончанию работы откачайте гелий из криостата. При комнатной температуре гелий диффундирует в межколбовое пространство стеклянного дьюара, что приводит к потере его теплоизолирующих свойств.

## 5 Проведение измерений в диапазоне температур 4.2-1.2 К.

Измерение температуры в диапазоне 4.2-1.2 К нужно производить по давлению насыщенных паров гелия. Газовый термометр тут работает плохо. Поэтому, чтобы измерять это давление Varotro'ом, мы жертвуем калибровкой газового термометра и открываем вентиль соединяющий его с объемом криостата.

### **ВНИМАНИЕ !!!**

Открыв этот вентиль, мы ни в коем случае не должны закрывать его до **ПОЛНОГО ОТОГРЕВА** криостата. Иначе давление, возникающее при отогреве холодного гелия в колбе газового термометра, разорвет эту колбу и, что еще хуже, разорвет датчик Varatron'a. (2 атмосферы, это максимум, что он выдержит!)

- Повторите описанную ранее процедуру подготовки и заливки гелия в установку. Запустите программу измерений.
- Включите насос гелиевой откачки. При этом вентиль к линии гелиевой откачки должен быть закрыт. Дождитесь, пока гелиевый насос выйдет на рабочий режим и начинайте очень медленно приоткрывать вентиль. Как только вы заметите, что откачка началась, перекройте гелиевую сеть (иначе вы будете ее откачивать:). Все время контролируйте давление по стрелке механического вакуумметра и не отходите от установки. При малом открытии вентиля он работает неустойчиво.

- Постепенно приоткрывая вентиль понижайте температуру. При достижении давления в  $\sim 5$  мБар произойдет переход гелия в свертекущее состояние, что можно увидеть по внезапному успокоению кипящей до этого поверхности жидкого гелия. Далее можно открыть вентиль откачки полностью, температура при этом будет довольно медленно опускаться до предельно низкой.
- Произведя измерения при охлаждении образца, начните измерения при его отогреве до 4.2К. Для этого закройте кран откачки и выключите гелиевый насос. Температура начнет подниматься, – сначала очень медленно, потом все быстрее и быстрее. Этот процесс можно контролировать по стрелке механического вакуумметра.

**В данной фазе работы не оставляйте установку без присмотра!**

Во время отогрева криостата до 4.2К все линии для испаряющегося гелия перекрыты. Не прозевайте момент, когда давление в криостате поднимется до атмосферного. Дальнейшее испарение гелия в запертом объеме приведет к срыву (или даже взрыву) стеклянных дьюаров

- Откройте линию гелиевой сети. Теперь можно спокойно продолжить измерения до полного испарения жидкого гелия и отогрева криостата.

По окончании работы откачайте гелий из криостата. При комнатной температуре гелий диффундирует в межколбовое пространство стеклянного дьюара, что приводит к потере его теплоизолирующих свойств!

## 6 Обработка результатов измерений

- Используя GnuPlot обработайте и постройте графики зависимости сопротивления образцов от температуры, а также графики вольт-амперных характеристик образцов. Графики должны иметь подписи к осям, заголовки и прочую информацию, позволяющую понять к чему он относится.
- Рассмотрите все известные вам механизмы рассеяния носителей зарядов и для каждого случая перерисуйте графики в осях (логарифмических, обратных, степенных и проч.), в которых данный механизм рассеяния явно проявляется или мог бы проявляться.

Качественные информативные графики служат хорошей основой для сообщения о результатах работы в отчете, докладе, научной статье. Сохранив макрос с командами GnuPlot'a, вы сможете использовать его впоследствии.

## 7 Отчет о лабораторной работе

### 7.1 Примерная структура отчета

- Титульный лист: название работы, ФИО, место учебы, курс, № учебной группы, дата.

- Формулировка задачи.
- Короткая обзорная («теоретическая») часть.  
 Дайте ссылки на те книги и журналы, информацию и данные из которых вы используете. Основная задача изложенного вами в теоретической части, – сформулировать физическую модель и выписать формулы для сравнения результатов вашего эксперимента с теорией.
- Описание эксперимента:
  - схема установки и ее описание;
  - схема измерений и ее описание;
  - скриншоты написанных вами программ LabVIEW и краткое описание ее функционирования;
  - газовый и/или конденсационный гелиевый термометр (если в данной работе он использовался): схема, расчет, калибровка, оценка ошибок при измерении температуры.
- Экспериментальные образцы. Процедура их приготовления, монтаж в криостате. Не лишним будут фотографии как самого образца, так и наиболее существенных фаз их приготовления.
- Результаты измерений. Необходимо привести рисунки с графиками экспериментальных результатов. Каждый график должен содержать название, обозначение осей (что по осям и в каких единицах) и сопровождаться подписью. Подпись должна быть подробной и самодостаточной. При сравнении результатов эксперимента с теорией следует изображать расчетные и экспериментальные кривые в тех шкалах (логарифмических, степенных, обратных и др.), в которых сравнение является наиболее наглядным.  
 Не забывайте об оценке погрешностей измерений!
- Обсуждение результатов. Надо убедительно показать, что полученные результаты надежны.  
 Постарайтесь рассмотреть всевозможные факторы, от которых результаты Вашего опыта могли бы существенно зависеть. Не было ли перегрева образцов, успевала ли выравниваться температура образца и газового термометра, не вошли ли в результаты неконтролируемые сопротивления подводящих проводов, ...? Тут можно привести как результаты соответствующих контрольных опытов, так и грубые оценки возможных паразитных эффектов.
- В Заключении нужно кратко сформулировать итоги работы и выводы, вытекающие из сравнения полученных результатов с ожидаемой теоретической моделью. Чем можно объяснить наблюдаемые отличия и какое улучшение методики работы можно было бы рекомендовать.
- В конце отчета приведите список использованной литературы;