

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



Е.И. Борзенко

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
РЕФРИЖЕРАТОРА-ОЖИЖИТЕЛЯ
НА КРИОГЕННОЙ ГЕЛИЕВОЙ УСТАНОВКЕ
КГУ-150/4,5**

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2014

УДК 621.59

Борзенко Е.И. Исследование режимов работы рефрижератора-ожижителя на криогенной гелиевой установке КГУ-150/4,5: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 40 с.

Представлены методические указания по выполнению лабораторных работ №1–№4 по исследованию режимов работы рефрижератора-ожижителя на криогенной гелиевой установке КГУ-150/4,5.

Предназначено для студентов направлений бакалавриата 140400, 140500, 141200, 140700 и специальностей 140401, 140504 всех форм обучения.

Рецензент: доктор техн. наук, проф. В.И.Пекарев

**Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом
Института холода и биотехнологий**



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, 2014

© Борзенко Е.И., 2014

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время криогенные системы, предназначенные для получения и использования гелиевых температур, стали важным инструментом научно-технического прогресса, особенно в областях, где стало возможным применение явления сверхпроводимости. Основным составляющим элементом криогенной гелиевой системы является криогенная гелиевая установка (ожижитель, рефрижератор или ожижитель-рефрижератор). При этом схемы криогенных гелиевых установок, в зависимости от холодопроизводительности и требуемого уровня криостатирования сверхпроводящих объектов, различаются числом ступеней охлаждения, способом включения детандеров, количеством технологических потоков и уровнем их давлений, типами теплообменных аппаратов, схемными решениями низкотемпературных ступеней охлаждения и рядом других признаков.

Очевидно, что эффективность криогенной гелиевой установки во многом зависит от правильно выбранных основных параметров криогенного цикла гелиевой установки [1–3]: рабочего давления; температурного уровня включения ступеней охлаждения и разностей температур; теплопритока из окружающей среды и др.

Выбор рабочего давления в значительной мере определяется стремлением к достижению максимального значения изотермического эффекта дросселирования на температурном уровне включения низкотемпературной ступени охлаждения. В современных ожижителях гелия с детандерными ступенями охлаждения, температура сжатого гелия перед концевой дроссельной ступенью равна 8–12 К и оптимальным давлением прямого потока в данном случае будет $p_2 = 1,8\text{--}2,4$ МПа. Вместе с тем эффективность дроссельной ступени охлаждения можно повысить, если сжатый гелий охлаждать не при постоянном давлении, равном инверсионному при $T = 8\text{--}12$ К, а при понижающемся давлении с помощью промежуточного дросселирования. При этом одновременно с повышением холодопроизводительности дроссельной ступени обеспечиваются наиболее благоприятные условия теплообмена в аппаратах заключительной ступени охлаждения.

В трехступенчатом гелиевом цикле температурный уровень включения детандерной ступени охлаждения находится в пределах 80÷66 К и определяется условиями кипения азота в аппарате ступени с внешним охлаждением. Понижение температуры кипения азота при-

водит к уменьшению количества гелия, расширяющегося в детандере, и к некоторому увеличению доли сжиженного гелия в цикле.

При наличии азотного охлаждения и одной детандерной ступени температурный уровень размещения нижней ступени охлаждения находится в пределах 10–12 К.

Значительное влияние на показатели работы гелиевой криогенной установки оказывает разность температур между потоками гелия на теплом конце теплообменных аппаратов, возникающая вследствие несовершенства процесса теплообмена, нарушения теплового и материального балансов.

На энергетическую эффективность гелиевого цикла существенное влияние оказывает значение разности температур между потоками гелия на теплом конце теплообменника нижней ступени охлаждения. В связи с этим недорекуперация ΔT при расчетах принимается ниже 1 К, а иногда даже снижается до 0,5–0,2 К.

При $T = 300$ К разность температур между потоками гелия обычно составляет 5–10 К, а при наличии предварительного охлаждения жидкими криопродуктами допускается увеличение до 15–20 К. Для температурного уровня включения ступени охлаждения $T_{\text{пр}} = 66\text{--}80$ К разность температур при расчетах принимается 2–4 К.

При расчете гелиевых установок значительную трудность представляет определение теплопритока из окружающей среды и его распределение между ступенями охлаждения. В большинстве случаев теплопритоки извне через изоляцию и тепловые мосты оцениваются в 3–5 % от холодопроизводительности (перепада энтальпий в детандере, изотермического эффекта дросселирования и т.п.).

Действительные параметры рабочего вещества, энергетические показатели криогенной гелиевой установки определяются при испытаниях действующих образцов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

ИЗУЧЕНИЕ КРИОГЕННОЙ ГЕЛИЕВОЙ УСТАНОВКИ

КГУ-150/4,5

Цель работы

1. Ознакомление с конструкцией, устройством и принципом действия гелиевой установки.
2. Изучение параметров установки при различных режимах работы.

1. Техническая характеристика и технические данные установки

Установка КГУ-150/4,5 работает по трехступенчатому циклу, состоящему из ступеней внешнего охлаждения, детандерной и дроссельной. В цикле используется поршневой детандер, а для внешнего охлаждения – жидкий азот.

Полезная холодопроизводительность установки в рефрижераторном режиме составляет 150 Вт при температуре 4,5 К. Производительность ее в ожижительном режиме 40 л/ч. Количество циркулирующего гелия 640 м³/ч. Рабочее давление цикла 2,5 МПа. Установленная мощность электродвигателей: гелиевого компрессора 302ГП-6130 – 60 кВт; I ВУВ-45/150 – 16 кВт.

Расход жидкого азота при работе, л/ч	
в рефрижераторном режиме	45
в ожижительном режиме	60
Продолжительность пускового периода, ч.....	4
Время непрерывной работы, ч.....	300
Время отогрева, ч	24
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч.....	7

2. Описание технологической схемы установки

Схема установки КГУ-150/4,5 представлена на рис. 1. Гелий всасывается компрессором 1, сжимается до давления около 2,5 МПа и охлаждается в конечном холодильнике до температуры окружающей среды. После этого гелий поступает в маслоотделитель 2, где освобождается от основного количества масла, уносимого из компрессора, затем поступает в фильтр грубой очистки 3, в котором очищается от остатков капельного масла, и поступает в фильтр тонкой очистки 4, где удаляются пары масла.

Очищенный от масла гелий поступает в блок осушки и очистки гелия А, вначале в осушитель 5, а затем в аппарат очистки 6. В осушителе гелий освобождается от паров воды. Осушка происходит за счет адсорбции паров влаги на поверхности силикагеля при температуре окружающей среды. После осушителя 5 гелий поступает в теплооб-

менник 7, где охлаждается потоком очищенного гелия и холодными парами азота, на внутренней поверхности трубок теплообменника происходит вымораживание остаточной влаги. Из теплообменника очищаемый поток направляется в адсорбер 8, адсорбер аппарата очистки заполнен активированным углем и термостатируется за счет кипения жидкого азота при $T = 80$ К. После очистки от воздуха и прочих газообразных примесей гелий возвращается в теплообменник 7, где нагревается прямым потоком примерно до температуры окружающей среды.

Перед поступлением в агрегат охлаждения гелий проходит фильтр, где очищается от унесённой из адсорбера угольной пыли.

Сжатый, очищенный гелий с давлением примерно 2,5 МПа и температурой окружающей среды поступает в агрегат охлаждения Б. Основная часть гелия направляется в трубки теплообменника 9, остальной гелий – в трубки аппарата 10 (в рефрижераторном режиме до 3 %). В теплообменнике 9 гелий охлаждается обратным потоком, в аппарате 10 – парами азота, поступающими из азотной ванны 11. Оба потока охлаждаются примерно до $T = 90$ К и, выйдя из теплообменников, смешиваются, после чего гелий поступает в азотную ванну 11. Распределение и регулировка потоков гелия в указанных теплообменниках осуществляется вентилем 3–12. Подача прямого потока в теплообменник 10 зависит от температуры выходящего азота на теплом конце этого теплообменника. Температура азота измеряется термометром $T-2$ и должна быть на 18–20 К ниже, чем температура прямого потока в точке $T-1$ (см. рис. 2). В азотной ванне гелий охлаждается до температуры примерно 80 К за счет кипящего азота.

После азотной ванны прямой поток поступает в теплообменник 12, охлаждается в нем примерно до 25 К, выйдя из него, делится на две части: в рефрижераторном режиме примерно 40 %, а в ожижительном – 70 % гелия направляется в детандер 13, в котором гелий расширяется до давления обратного потока 0,12 МПа и одновременно охлаждается до температуры 10,5 К. Температура гелия до и после детандера измеряется термометрами $T-3$ и $T-4$. Вышедший из детандера гелий присоединяется к обратному потоку и поступает в межтрубное пространство теплообменника 14.

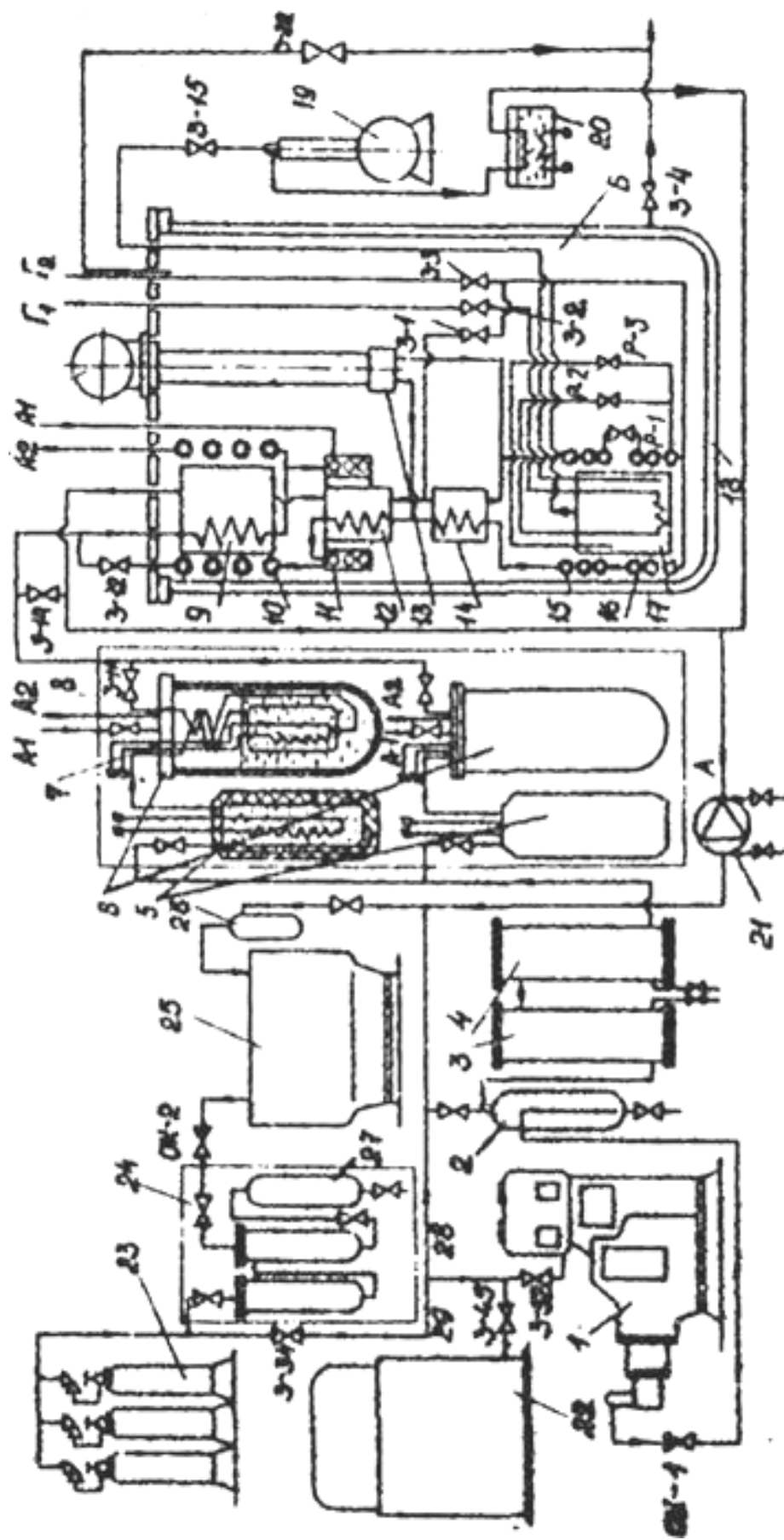


Рис. 1. Схема криогенной гелиевой установки КГУ-150/4,5:

1-29 – см. по тексту;

А – блок очистки и осушки; Б – агрегат охлаждения; А₁ – жидкий азот; А₂ – газообразный азот;

Г₁ – гелий к потребителю; Г₂ – гелий от потребителя

Оставшаяся часть гелия прямого потока, которая не попала в детандер (дроссельный поток), после теплообменника 12 последовательно проходит по трубкам теплообменников 14, 15, 16. На выходе из теплообменника 15 гелий имеет температуру в рефрижераторном режиме примерно 7 К, а в ожижительном около 9 К. Между теплообменниками 15 и 16 гелий проходит через дроссельный вентиль Р-1, в котором давление гелия понижается с 2,4–2,5 МПа до 0,4–0,7 МПа.

В теплообменнике 16 гелий при давлении 0,4–0,7 МПа охлаждается в рефрижераторном режиме примерно до 4,8–5 К, а в ожижительном – до 6–6,5 К; температура в этой точке замеряется термометром Т-8.

В рефрижераторном режиме часть гелия дросселируется в вентиле Р-3 до давления 0,13 МПа и частично сжижается. Смесь пара и жидкости поступает в сборник жидкого гелия 17, где разделяется на пар и жидкость. Количество гелия, направляемого через вентиль Р-3, должно быть таким, чтобы змеевик, расположенный в сборнике, в процессе работы оставался погруженным в жидкость. Остальной гелий дросселируется в вентиле Р-2, проходит через змеевик сборника и в виде парожидкостной смеси направляется через вентиль 3–2 к потребителю с температурой примерно 4,6 К. У потребителя жидкая фаза испаряется, отдавая свой холод на охлаждение оборудования. Обратный поток Г_2 газообразного гелия возвращается от потребителя через вентиль 3–3 при давлении около 0,13 МПа и с температурой примерно 4,5 К смешивается с парами гелия из сборника и поступает в межтрубное пространство теплообменника 16. Температура гелия, направляющегося к потребителю и возвращающегося от потребителя, замеряется термометрами Т-6 и Т-7. Температура обратного потока на выходе из блока охлаждения Б примерно на 12–15 К ниже, чем температура гелия на входе. Обратный поток гелия поступает на всасывание компрессора 1. Цикл замыкается. Обратный поток гелия замеряется с помощью диафрагмы 21.

В ожижительном режиме весь гелий дроссельного потока дросселируется в вентиле Р-3. Жидкость, собравшаяся в сборнике, сливается в транспортный сосуд 19. Образующиеся при сливе пары гелия отводятся через подогреватель 20 и направляются в газгольдер 22.

В блоке имеется байпасная линия с вентилем 3–1, которая используется в пусковом периоде. Внутренняя полость блока охлаждения, в которой находится аппаратура, вакуумируется. Абсолютное

давление в этом пространстве в теплых условиях составляет 10 Па. Вакуумирование изоляционного кожуха 18 блока охлаждения и сливных сифонов производится до остаточного давления при температуре окружающей среды. Для этой цели используется механический насос 2НВР-5Д и высоковакуумный агрегат Н-ИС-2.

В газгольдере 22 хранятся запасы гелия низкого давления для компенсации утечек гелия, одновременно он является буферной емкостью и создает избыточное давление на всасывание гелиевого компрессора 200–300 мм вод. ст. Подпитка системы гелием при захолаживании установки и в режиме ожижения осуществляется из рампы 23, в баллонах которой гелий хранится при давлении до 15 МПа. Во время остановки установки избыток гелия закачивается обратно в баллоны рампы вспомогательным компрессором I ВУВ-45/150 25. После сжатия в компрессоре I ВУВ-45/150 гелий очищается от масла в блоке маслоотделения 24. Очистка происходит при температуре окружающей среды вначале в маслоотделителе 28 от капельного масла, а затем в адсорбере 29 от паров масла. Масло из маслоотделителя сливается в бачок продувок 27, в котором отделяется увлеченный с маслом гелий. Маслоотделитель 26, установленный на всасывающей линии компрессора 25, служит для улавливания масла. Собранное масло сливается в коллектор продувок.

Блок осушки и очистки укомплектован механическим вакуум-насосом 2НВР-5Д для регенерации адсорбентов и паромасляным насосом Н-ИС-2, предназначенным для вакуумирования изоляционного пространства сосуда Дьюара очистителя.

Жидкий азот в азотную ванну блока охлаждения подается из транспортного резервуара ТРЖК-4М. Второй такой сосуд обеспечивает жидким азотом блок осушки и очистки.

3. Устройство, работа и техническая характеристика составных частей установки

Основными частями установки являются агрегат охлаждения, компрессоры для сжатия гелия, блок осушки и очистки.

3.1. Компрессор гелиевый угловой 302 ГП-6/30

Производительность, м ³ /ч	360
Рабочее давление, МПа	2,5–3,0
Давление всасывания, кПа	4–6
Число оборотов в минуту, об./мин.....	735
Мощность на валу компрессора, кВт.....	60
Число ступеней, шт.	3

3.2. Электродвигатель компрессора 302ГП-6/30

Род тока	Переменный
Тип	AB2-101-8H4T5-П
Мощность, кВт	75
Число оборотов в минуту, об./мин.....	735
Напряжение, В.....	220/380

3.3. Вспомогательный компрессор I ВУВ-45/150 (для закачки гелия в баллоны)

Производительность, м ³ /ч	45
Число оборотов в минуту, об./мин.....	620
Рабочее давление, МПа	15
Мощность на валу компрессора, кВт.....	18
Число ступеней, шт.	3

3.4. Электродвигатель компрессора I ВУВ-45/150

Род тока	Переменный
Тип	ВАС-71-4
Мощность, кВт	22
Число оборотов в минуту, об./мин.....	1460
Напряжение, В.....	380

Агрегат охлаждения включает в себя блок охлаждения, шкаф управления и КИП, форвакуумный насос 2НВР-5Д, диффузионный насос Н-ИС-2 и два подогревателя.

3.5. Блок охлаждения

В блоке охлаждения происходит понижение температуры гелия от T_0 до температуры ожидения гелия (примерно 4,5 К). Одновременно в теплообменниках блока происходит рекуперация холода обратного потока, поступающего из сборника гелия и от потребителя.

Блок охлаждения включает в себя шесть теплообменников, гелиевый детандер, азотную ванну, сборник жидкого гелия, два сливных сифона, три холодных запорных и три дроссельных вентиля, двухсекционный электронагреватель. Это оборудование заключено в кожух с вакуумно-слоистой изоляцией и закрыто сверху крышкой; кожух укреплен на раме.

Для изготовления теплообменников применена медная трубка диаметром 3 мм и толщиной стенки 0,35 мм с наружным оребрением медной проволокой 0,5 мм. Обечайки и прочие детали теплообменников сделаны из нержавеющей стали X18H10T. Во всех теплообменниках по трубкам диаметром 3 мм и толщиной стенки 0,35 мм проходит сжатый гелий прямого потока, в межтрубном пространстве – гелий обратного потока.

Теплообменники 9, 12, 14 выполнены как витые поперечно-точные многослойные аппараты. На сердечнике (диаметром соответственно 82, 79 и 79 мм) навиты оребренные трубки диаметром 3 мм и толщиной стенки 0,35 мм.

Чтобы исключить проток газа обратного потока вдоль обечайки, последний слой трубок в каждом теплообменнике обмотан жгутом диаметром 3–4 мм, изготовленным из пленки ПЭТФ-8 путем скручивания, а затем обернут в несколько слоев фторопластовой пленкой. Обечайки теплообменников плотно насажены на указанную обмотку.

Азотная ванна 11 служит для охлаждения гелия прямого потока. Ванна представляет собой двустенный цилиндрический сосуд. В кольцевом пространстве между стенками расположен змеевик, навитый из гладкой медной трубки диаметром 16 мм и толщиной стенки 1 мм. По трубкам змеевика проходит сжатый гелий, в межтрубном пространстве кипит жидкий азот. В верхнем доньшке ванны имеются штуцера для залива жидкого азота в ванну и выхода газообразного азота. Сверху и снизу ванны выведены импульсные

трубки для указателя уровня жидкого азота. Ванна изготовлена из нержавеющей стали Х18Н10Т.

Сборник жидкого гелия 17 объемом 41 л предназначен для накапливания и хранения жидкого гелия при работе в ожижительном и рефрижераторном режимах; изготовлен из нержавеющей стали Х18Н10Т. В сосуд вмонтирован змеевик из медной трубки диаметром 12 мм и толщиной стенки 1 мм. В верхней части сборника имеется штуцер, к которому припаяна трубка от вентиля Р-3. К концу трубки прикреплен сепаратор, представляющий собой перфорированную гильзу, обмотанную металлической сеткой в два слоя. В сепараторе происходит разделение парожидкостной смеси на жидкость и пар. Сборник гелия снабжен указателем уровня, для чего из него выводятся импульсные трубки диаметром 3 мм и толщиной стенки 0,5 мм.

В верхнее днище сборника гелия вмонтирована глухая гильза из медной трубы диаметром 22 мм и толщиной стенки 1 мм, в которую вставляется двухсекционный электронагреватель мощностью 100 Вт, он используется для поддержания в заданных пределах уровня жидкого гелия в сборнике в рефрижераторном режиме путем выпаривания части жидкости.

Кожух блока охлаждения 18 представляет собой цилиндрический двустенный сосуд из нержавеющей стали Х18Н10Т с вакуумно-слоистой изоляцией. Нижняя часть внутреннего сосуда с наружной стороны обмотана девятью слоями политерефталатной металлизированной пленки. Внизу к днищу прикреплена камера с активированным углем для улучшения вакуума в изоляционном пространстве при охлаждении блока. На поверхности угля в процессе охлаждения адсорбируется остаточное количество воздуха. Остаточное давление в изоляционном пространстве в рабочем режиме составляет 1–10 МПа ($1 \times 10^{-5} \div 1 \times 10^{-6}$ мм рт. ст.). На наружной обечайке кожуха расположен запорный вакуумный вентиль 3-4, к которому подсоединяется насос Н-ИС-2, работающий в паре с насосом 2НВР-5Д.

Сверху кожух закрыт крышкой, на которой монтируется все оборудование блока. Снаружи на крышке расположен механизм движения поршневого детандера, вывода гелиевых и азотных труб и импульсных трубок к указателю уровня жидкого азота и манометрам, маховики запорных вентилях. С внутренней стороны к крышке подвешены теплообменники и детандер (таблица).

Техническая характеристика гелиевого детандера ДПГ 4-24/02

Техническая характеристика	Показатель		
Число оборотов, об./мин	150	300	375
Производительность, м ³ /мин	2,4	4	6
Пределы регулирования холодопроизводительности при постоянном числе оборотов, %	+22 –35	+30 –25	+22 –35
КПД (при 100 %-й производительности), %	75	75	75
Диаметр поршня, мм	60	60	60
Ход поршня, мм	70	70	70
Мощность электродвигателя, кВт	1,8	2,5	–

3.6. Система маслоочистки

После гелиевого компрессора 302ГП-6/30 для очистки гелия от масла установлены последовательно три аппарата: маслоотделитель 2, фильтр грубой очистки 3, фильтр тонкой очистки 4.

Маслоотделитель 2 представляет собой цилиндрический сосуд. Поступающий гелий получает винтовое направление движения и под действием возникающих центробежных сил капли масла отбрасываются к стенкам и стекают вниз. Газ, освобожденный от капельного масла, уходит через штуцер вверху сосуда.

Фильтр грубой очистки 3 установлен за маслоотделителем и предназначен для очистки гелия от унесенных из маслоотделителя капель масла. Фильтр представляет собой цилиндрический сосуд, в который вставлена корзина с насадкой. Насадка состоит из пяти слоев гигроскопической бытовой ваты, спрессованной при давлении 0,1 МПа. Высота слоя ваты 45–50 мм. Между слоями ваты засыпаны кольца Рашига диаметром 16 мм. Слои колец отделены от слоев ваты металлической сеткой. Между двумя верхними слоями ваты проложена стеклянная фильтровальная ткань. Масло, накопившееся в фильтре и маслоотделителе, периодически удаляется в коллектор продувок.

Фильтр тонкой очистки 4 установлен за фильтром грубой очистки и предназначен для очистки гелия от паров масла; представляет собой такой же сосуд, как и фильтр грубой очистки. В корзину загружен активированный уголь марки СКТ. В нижней части корзины расположен слой гигроскопической прессованной ваты.

После компрессора 1ВУВ-45/150 установлен блок маслоотделителя высокого давления, состоящий из маслоотделителя 28, адсорбера 29, скомпонованных в единый блок.

Маслоотделитель 28 представляет собой толстостенный стальной баллон диаметром 114 мм с толщиной стенки 11 мм. Внутри баллона в верхней части вставлено несколько конусов из металлической сетки. Гелий поступает в нижнюю часть аппарата, меняет направление и теряет скорость, в результате чего отделяется от масла. Капли масла задерживаются сетками, стекают вниз и удаляются через штуцер с продувочным вентилем.

Адсорбер 29 представляет собой такой же баллон, как и маслоотделитель 19. Нижняя часть баллона заполнена кольцами Рашига с прослойками из гигроскопической ваты, верхняя – активированным углем марки СКТ. Вверху над углем расположены пакеты спрессованной гигроскопической ваты. На дне баллона имеется отстойник, где происходит выделение оставшегося в гелии масла в результате изменения направления и уменьшения скорости. На поверхности колец Рашига и на вате происходит оседание мельчайших капелек масла. На пористой поверхности угля адсорбируются пары масла.

Бачок продувок 27 предназначен для сбора масла и отделения от этого масла газообразного гелия, унесенного при продувках.

3.7. Блок осушки и очистки

Блок предназначен для очистки технического гелия перед его поступлением на охлаждение или ожижение. Состоит из двух одинаковых попеременно работающих ветвей. Когда в одной паре осушитель-очиститель проходит очистка гелия, вторая пара регенерируется. Регенерация силикагеля в осушителе и активированного угля в очистителе производится путем нагревания адсорбента до температуры +80 °С специальными вмонтированными в эти аппараты электронагревателями. Десорбированные газы откачиваются механическим вакуумным насосом 2НВР-5Д. Перед поступлением в насос отсасываемые газы проходят через ловушку, охлаждаемую жидким азотом. В ловушке вымораживается влага, которая в случае попадания в насос отрицательно влияет на качество вакуумного масла.

Блок осушки и очистки смонтирован в специальном шкафу. Все электропусковые и контрольно-измерительные устройства, необ-

ходимые при эксплуатации блока осушки и очистки, размещены в шкафу приборов, который монтируется рядом с блоком осушки и очистки гелия. В шкафу приборов находится также вакуумный насос 2НВР-5Д, газоанализатор.

Осушитель 5 – баллон, заполненный силикагелем. Для охлаждения осушителя обечайка баллона снаружи имеет полость, в которой циркулирует вода. Баллон осушителя заключен в кожух, а пространство заполнено для изоляции минеральной ватой. Температура стенок баллона при регенерации контролируется термopарами.

Очиститель 6 представляет собой сосуд Дьюара из нержавеющей стали с вакуумной изоляцией, внутри которого вмонтирован теплообменник-змеевик 7 и баллон-адсорбер 8, заполненный активированным углем. Гелий проходит теплообменник и азотную ванну, попадает в нижнюю часть адсорбера, проходит слой активированного угля, очищается от примесей воздуха, нагревается в змеевике и выходит из очистителя. Азот заливается через штуцер на кожухе блока.

Контроль уровня жидкого азота в очистителе ведется с помощью уровнемера. Охлаждение адсорбера после регенерации производится жидким азотом.

Фильтр представляет собой баллон, между решетками которого заложена гигроскопическая вата, на выходе установлен фильтрующий стакан, изготовленный из полимерного мелкопористого материала типа ФЭП.

3.8. Газгольдер. Запорная и предохранительная арматура

Газгольдер 16 объемом 6 м³ служит для хранения гелия низкого давления. Газгольдер имеет обычную телескопическую конструкцию с масляным затвором.

Вентили. На теплых гелиевых коммуникациях установлены запорные вентили обычной конструкции с сильфонным уплотнением. Блок охлаждения оснащен четырьмя одинаковыми запорными холодными вентилями с сильфонным уплотнением шпинделя. Эти вентили расположены во внутренней полости блока охлаждения на линиях подачи холодного гелия к потребителю, возвращения гелия от потребителя и на байпасных пусковых линиях. Уплотнение затвора вентиля – запрессованное кольцо из фторопласта 4В. Шпиндель вентиля

имеет длину около 2 м, маховик расположен снаружи, на крышке блока охлаждения.

Предохранительные разрывные мембраны предназначены защищать внутреннюю полость в случае превышения давления, а также систему гелия обратного потока низкого давления. Такие же мембраны установлены на очистителях блока очистки и осушки.

Мембрана представляет собой алюминиевую пластину толщиной 0,05 мм, диаметром 40 мм. Снаружи мембраны закрыты защитными колпачками с отверстиями для выхода газа.

Обратные клапаны установлены на линиях нагнетания компрессоров. Служат для предотвращения обратного хода сжатого газа в компрессор при остановках компрессора. В том случае, когда давление за клапаном становится выше, чем перед ним, клапан закрывается под действием этого избыточного давления.

3.9. Контрольно-измерительные приборы

Установка КГУ-150/4,5 снабжена необходимыми для эксплуатации приборами измерения давлений, температур, уровней жидкого гелия и азота, контроля работы детандера.

3.9.1. Измерение давлений

Для определения давления установка оснащена манометрами, мановакуумметрами, тягонапоромерами и приборами для измерения глубокого вакуума. Манометры и мановакуумметры имеют обычную конструкцию с трубкой Бурдона.

Дифманометры – тягонапоромеры ДГ МП-100 установлены на всасывании компрессоров, а также для определения давления гелия в сосудах Дьюара. Для определения остаточного давления в изоляционном кожухе агрегата охлаждения установка снабжена переносным ионизационным вакуумметром ВИТ-2 в комплекте с лампами ПМТ-2 и ПМИ-2.

3.9.2. Измерение температуры

Для измерения температуры на установке имеется 10 термометров сопротивления. Из них 6 термометров – типа ТСР-4054 с пла-

тиновым элементом сопротивления и 4 термометра – типа ТСАД-2 арсенид-галиевым элементом.

Платиновые термометры замеряют температуры выше 13 К и расположены на входе гелия в блок охлаждения, на выходе газообразного азота из блока охлаждения, на входе гелия в детандер и выходе из него, на линии к дроссельным вентилям Р-2 и Р-3, на байпасной линии 3–1.

Арсенид-галиевые термометры расположены на потоках гелия к потребителю, от потребителя, на выходе из детандера, на линии к дроссельным вентилям Р-2 и Р-3, где температуры ниже 13 К.

Измерение температуры производится с помощью вторичного прибора типа СПЛ-160-058. Расположен вторичный прибор на щите приборов агрегата охлаждения.

3.9.3. Измерение уровней

Агрегат охлаждения снабжен двумя однотипными указателями уровня для определения уровня жидкого азота в азотной ванне и уровня жидкого гелия в сборнике.

Указатель уровня состоит из первичного прибора-датчика и вторичного прибора. Первичным прибором является дифференциальный манометр типа ДМ с электрическим выходом.

Вторичный прибор – амперметр щитовой узкопрофильный.

Осциллограф типа С1-19В – электронный индикатор давления. При работе детандера на экране осциллографа изображается действительная индикаторная диаграмма.

Требования к отчету по лабораторной работе

После изучения описания устройства и принципа действия криогенной гелиевой установки студенты знакомятся с устройством КГУ-150/4,5 в лаборатории кафедры и составляют отчет.

Отчет по лабораторной работе № 1 включает в себя принципиальную схему, краткое описание устройства и принципа действия установки и паспортные данные машин и агрегатов, комплектующих КГУ-150/4,5.

18

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННОЙ ГЕЛИЕВОЙ УСТАНОВКИ КГУ-150/4,5, РАБОТАЮЩЕЙ В ОЖИЖИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Объект исследования

Криогенная гелиевая установка имеет три ступени охлаждения: внешнюю, детандерную и дроссельную. Принципиальная схема установки представлена на рис. 2, а изменение параметров гелия в диаграмме $T-s$ – на рис.3.

Поток газообразного гелия G_k сжимается в компрессоре 1 до давления p_2 и охлаждается в теплообменных аппаратах II-IV (рис.2). После теплообменника IV часть гелия G_d направляется в поршневой детандер, где расширяется до давления обратного потока.

Оставшаяся часть гелия $G_{др}$ после теплообменника VI дросселируется в вентиле Р-1 до промежуточного давления $p_{пр}$, охлаждается в аппарате VII и дросселируется вентилем Р-3 до давления p_1 . Полученная при этом парожидкостная смесь направляется в сборник VIII, где разделяется на пар и жидкость. Жидкость G накапливается в сборнике, а пар проходит в межтрубном пространстве теплообменников, смешивается с детандерным потоком, и образовавшийся обратный поток выходит из установки с температурой T_1' . Количество обратного потока $G_{обр}$ замеряется с помощью диаграммы XVI. Часть гелия, равная количеству $(G + G_{ут})$, добавляется к обратному потоку и подается на всасывание компрессора.

В ванне III азот кипит при атмосферном давлении, его количество определяется счетчиком XV. Расход жидкого азота, применяемого для охлаждения адсорбера в блоке очистки и осушки, измеряется газовым счетчиком XIV.

Задачи исследования

1. Ознакомиться с работой криогенной гелиевой установки КГУ-150/4,5 в ожижительном режиме.
2. Определить удельные материальные потоки в отдельных ступенях охлаждения.
3. Рассчитать коэффициент ожижения.
4. Найти изоэнтропный КПД детандера.
5. Определить потери холодопроизводительности в ступенях охлаждения.

6. Найти действительную холодопроизводительность ступеней охлаждения.

7. Определить удельные величины расхода энергии и жидкого азота на ожижение гелия.

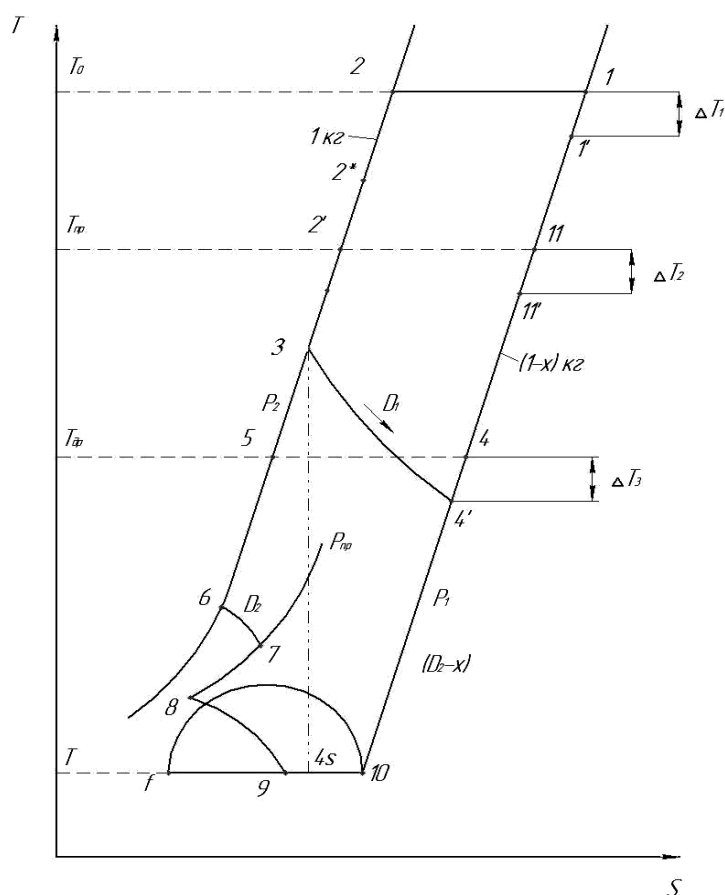


Рис. 3. Изменение параметров гелия при работе установки в ожижительном режиме

Содержание работы

Перед проведением, лабораторной работы оценивается герметичность установки и устанавливается величина утечек гелия $G_{ут}$, которая определяется по перемещению колокола газгольдера при выдержке заполненной гелием установки.

Измерения параметров проводят после выхода установки на установившийся режим работы. Обработка результатов испытаний проводится в расчете на 1 кг сжимаемого гелия.

Обработка результатов измерений

1. По значению изменения объема гелия в газгольдере определить действительную производительность установки, кг/с

$$G = \frac{\Delta V}{\Delta \tau} \frac{(B + p_0') T_n}{T_0 p_n} \rho_{\text{He}} - G_{\text{ут}}, \quad (1)$$

где ΔV – объем гелия, вышедший из газгольдера за время $\Delta \tau$, м³; $\Delta \tau$ – продолжительность опыта, с; B – барометрическое давление, Па; $p_0' = 0,098 p_0$ – избыточное давление гелия в газгольдере, ГПа; T_0 – температура в помещении лаборатории, К; $T_n = 273$ К; $p_n = 1013,2$ ГПа; $\rho_{\text{He}} = 0,178$ кг/м³ – плотность газообразного гелия при температуре T_0 и давлении $(B + p_0')$ [2].

2. По показаниям дифманометра диафрагмы определить количество обратного потока, кг/с

$$G_{\text{обр}} = \mu f \sqrt{2 \Delta p \cdot \rho_{\text{He}}}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент истечения диафрагмы; f – площадь сечения отверстия диафрагмы, м²; ρ_{He} – плотность гелия перед сечением диафрагмы, кг/м³; $\Delta p = h \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot g$ – напор истечения, Па.

3. Количество гелия, всасываемого компрессором, кг/с

$$G_k = G_{\text{обр}} + G. \quad (3)$$

4. По значениям давления $p_{\text{пр}} = p_7$ и температуры T_8 определить значение энтальпии i_8 и найти долю пара α_n в парожидкостной смеси, полученной после дросселирования в вентиле Р-3.

5. Доля жидкости во влажном паре равна $(1 - \alpha_n)$.

6. Количество гелия, поступающего в дроссельную ступень, кг/с

$$G_{\text{др}} = \frac{G}{1 - \alpha_n}, \quad (4)$$

или отнесенное к 1 кг сжимаемого гелия

$$D_2 = \frac{G_{\text{др}}}{G_k}. \quad (5)$$

7. Количество гелия, поступающее на расширение в детандер, кг/с

$$G_d = G_k - G_{\text{др}}, \quad (6)$$

или отнесенное к 1 кг сжимаемого гелия, кг/кг

$$D_1 = \frac{G_{\text{д}}}{G_{\text{к}}}. \quad (7)$$

8. Определить коэффициент ожижения гелия, кг/кг

$$x = \frac{G}{G_{\text{к}}}. \quad (8)$$

9. Определить значения энтальпий во всех характерных точках цикла (см. рис. 3).

10. По параметрам состояния гелия перед детандером (p_3, T_3) и после него (p_{10}, T_4) определить изоэнтропный КПД детандера

$$D_1 = \frac{G_{\text{д}}}{G_{\text{к}}}. \quad (9)$$

11. Определить по счетчику XV расход жидкого азота во внешней ступени охлаждения, кг/с

$$G_A = \frac{\Delta V_{5a}}{\Delta \tau} \frac{(B + p_{5a}') T_{\text{н}}}{T_{5a} p_{\text{н}}} \rho_{\text{N}_2}, \quad (10)$$

где ρ_{N_2} – плотность азота при T_{5a} и давлении $(B + p_{5a}')$, кг/м³; ΔV_{5a} – расход газообразного азота, проходящего через счетчик за время $\Delta \tau$, м³; $p_{5a} = 0,098 p_{5a}'$ – избыточное давление перед счетчиком, ГПа; T_{5a} – температура азота перед счетчиком, К; $T_{\text{н}} = 273$ К; $p_{\text{н}} = 1013,2$ ГПа.

Найти удельные затраты азота

$$g_A = \frac{G_A}{G_{\text{к}}}. \quad (11)$$

12. Определить по счетчику IV расход жидкого азота в блоке осушки и очистки, кг/с

$$G_A' = \frac{\Delta V_{2a}}{\Delta \tau} \frac{(B + p_{2a}') T_{\text{н}}}{T_{2a} p_{\text{н}}} \rho_{\text{N}_2}. \quad (12)$$

Найти удельные затраты азота

$$g_A' = \frac{G_A'}{G_{\text{к}}}. \quad (13)$$

13. Из баланса холодопроизводительности дроссельной ступени охлаждения [1] определить приток теплоты из окружающей среды, кДж/кг

$$q_c^{\text{III}} = (\Delta i_{T_5} - c_p \Delta T_3) - \frac{x}{D_2} (i_{4'} - i_f), \quad (14)$$

где $\Delta i_{T_5} = i_4 - i_5$ – изотермический эффект дросселирования на температурном уровне $T_{yp} = T_5$, кДж/кг; $\Delta T_3 = T_5 - T_4'$ – разность температур на входе в ступень охлаждения, К.

14. Найти действительную холодопроизводительность дроссельной ступени охлаждения, кДж/кг

$$q_{др} = D_2 (\Delta i_{T_5} - c_p \Delta T_3 - q_c^{\text{III}}). \quad (15)$$

15. Определить распределение холодопроизводительности дроссельной ступени охлаждения, кДж/кг:

– количество теплоты, сводимой от ожижаемой части потока гелия, кДж/кг

$$q_{\text{п}}^{\text{III}} = x(i_{4'} - i_f), \quad (16)$$

или в долях холодопроизводительности ступени охлаждения

$$q_{\text{п}}^{\prime \text{III}} = \frac{q_{\text{п}}^{\text{III}}}{D_2 \Delta i_{T_2}}; \quad (17)$$

– потери от неполной рекуперации и на компенсацию притока теплоты из окружающей среды, кДж/кг

$$q_{\text{пот}}^{\text{III}} = D_2 (c_p \Delta T_3 - q_c^{\text{III}}), \quad (18)$$

или в долях к полной холодопроизводительности

$$q_{\text{пот}}^{\prime \text{III}} = \frac{q_{\text{пот}}^{\text{III}}}{D_2 \Delta i_{T_5}}. \quad (19)$$

16. Из баланса холодопроизводительности детандерной ступени охлаждения [1] определить приток теплоты из окружающей среды, кДж/кг

$$q_c^{\text{II}} = D_1 (\Delta i_{T_2'} + h_s \eta_s - c_p \Delta T_2) - x(i_{11} - i_{4'}) - D_2 [\Delta i_{T_5} - \Delta i_{T_2} + c_p (\Delta T_2 - \Delta T_3)], \quad (20)$$

где $\Delta i_{T_5} = i_4 - i_5$ – изотермический эффект дросселирования при $T_{др} = T_5$, кДж/кг; $h_s \eta_s = i_3 - i_4'$ – действительная холодопроизводительность детандера, кДж/кг; $\Delta i_{T_2'} = i_{11} - i_{2'}$ – изотермический эффект дросселирования при $T_{пр} = T_{2'}$, кДж/кг; $\Delta T_2 = T_{2'} - T_{11'}$ – разность температур на входе в детандерную ступень охлаждения, К.

17. Определить распределение холодопроизводительности детандерной ступени охлаждения, кДж/кг:

$$q_d = D_1(\Delta i_{T_2'} + h_s \eta_s - c_p \Delta T_2 - q_c^{\text{II}}); \quad (21)$$

– количество теплоты, отводимое от ожижаемой части потока гелия, кДж/кг

$$q_{\text{II}}^{\text{II}} = x(i_{11'} - i_{4'}), \quad (22)$$

или в долях холодопроизводительности ступени охлаждения

$$q_{\text{II}}^{\text{II}} = \frac{q_{\text{II}}^{\text{II}}}{q_d}; \quad (23)$$

– количество теплоты, используемое для компенсации разности дроссель-эффекта, кДж/кг

$$q_{\Sigma_2}^{\text{I}} = D(\Delta i_{T_5} - \Delta i_{T_2'}), \quad (24)$$

или в долях к холодопроизводительности ступени охлаждения

$$q_{\Sigma_2}^{\text{I}} = \frac{q_{\Sigma_2}^{\text{I}}}{q_d}; \quad (25)$$

– часть холодопроизводительности, эквивалентная разности от неполноты рекуперации теплоты при T_2' и T_5

$$q_{\Sigma_2}^{\text{II}} = D_2[c_p (\Delta T_2 - \Delta T_3)], \quad (26)$$

или в долях к холодопроизводительности ступени охлаждения

$$q_{\Sigma_2}^{\text{II}} = \frac{q_{\Sigma_2}^{\text{II}}}{q_d}; \quad (27)$$

– доля холодопроизводительности ступени охлаждения, используемая для компенсации притока теплоты из окружающей среды

$$q_{\Sigma_2}^{\text{III}} = \frac{D_2 q_c^{\text{II}}}{q_d}. \quad (28)$$

18. Из баланса холодопроизводительности ступени с внешним охлаждением [1] определить приток теплоты из окружающей среды, кДж/кг

$$q_c^{\text{I}} = g_a(i_{4a} - i_{1a}) - x(i_{1'} - i_{11'}) - [\Delta i_{T_2'} - \Delta i_{T_1} + c_p(\Delta T_1 - \Delta T_2)], \quad (29)$$

где $g_a(i_{4a} - i_{1a})$ – холодопроизводительность, вносимая жидким азотом, кДж/кг; $\Delta T_1 = T_2 - T_{1'}$ – разность температур на входе в ступень охлаждения, К.

19. Найти распределение холодопроизводительности внешней ступени охлаждения:

– действительная холодопроизводительность, кДж/кг

$$q_0 = g_a(i_{4a} - i_{1a}); \quad (30)$$

– количество теплоты, отводимое от ожидаемой части потока гелия, кДж/кг

$$q_{\text{п}}^{\text{I}} = x(i_{\text{г}} - i_{\text{г}'}) , \quad (31)$$

или в долях

$$q_{\text{п}}^{\prime \text{I}} = \frac{q_{\text{п}}^{\text{I}}}{q_0} ; \quad (32)$$

– количество теплоты, используемое для компенсации разности дроссель-эффектов, кДж/кг,

$$q_{\Sigma}^{\text{I}} = \Delta i_{T_2} - \Delta i_{T_1} , \quad (33)$$

или в долях

$$q_{\Sigma_1}^{\prime \text{I}} = \frac{q_{\Sigma_1}^{\text{I}}}{q_0} ; \quad (34)$$

– часть холодопроизводительности, эквивалентная разности потерь от неполноты рекуперации теплоты при T_2 и T_2' , кДж/кг

$$q_{\Sigma_1}^{\text{II}} = c_p (\Delta T_1 - \Delta T_2) , \quad (35)$$

или в долях

$$q_{\Sigma_1}^{\prime \text{II}} = \frac{q_{\Sigma_1}^{\text{II}}}{q_0} ; \quad (36)$$

– доля холодопроизводительности ступени охлаждения, используемая для компенсации притока теплоты из окружающей среды, кДж/кг

$$q_{\Sigma_1}^{\prime \text{III}} = \frac{q_c^{\text{I}}}{q_0} . \quad (37)$$

20. Определить суммарный приток теплоты из окружающей среды, кДж/кг

$$q_c = q_c^{\text{I}} + q_c^{\text{II}} + q_c^{\text{III}} . \quad (38)$$

21. Удельный расход энергии на ожижение гелия, кДж/кг

$$l_0 = \frac{N_{\text{к}}}{G} + \frac{(G_{\text{А}} + G_{\text{А}}') l^{\text{N}_2}}{G} + \frac{N_{\text{в}}}{G} , \quad (39)$$

где $N_{\text{к}}$ – показание измерителя мощности электропривода компрессора, кВт; $N_{\text{в}}$ – показания измерителя мощности электроприводов вакуумных насосов, кВт; $l^{\text{N}_2} = 5370$ кДж/кг – расход энергии на получение жидкого азота [1].

Отчет по работе

Отчет должен включать:

1. Схему криогенной установки.
2. Протокол наблюдений.
3. Обработку результатов измерений.
4. Анализ работы установки.
5. Выводы, полученные в результате обработки экспериментальных данных.

Техника безопасности

1. В помещении лаборатории соблюдать чистоту.
2. Не подходить к оборудованию в расстегнутой одежде. Одежда должна быть аккуратно заправлена, чистая и не промасленная.
3. Не опираться на работающие машины.
4. Не включать и не выключать самостоятельно тумблеры на шкафах управления.
5. Не включать электрооборудование и приборы.
6. Запрещается самостоятельно вращать вентили, задвижки на газовых коммуникациях, щитах контроля и управления.
7. Не допускать попадания жидкого азота на скрытые участки тела и на одежду.
8. Запрещается производить заправку аппаратов установки жидким азотом без рукавиц.
9. Во время испытаний установки запрещается открывать двери шкафов управления.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННОЙ ГЕЛИЕВОЙ УСТАНОВКИ КГУ-150/4,5, РАБОТАЮЩЕЙ В РЕФРИЖЕРАТОРНОМ РЕЖИМЕ

Объект исследования

Криогенная гелиевая установка имеет три ступени охлаждения, ее принципиальная схема представлена на рис. 2, а изменение параметров гелия в диаграмме $T-s$ – на рис. 4.

Поток газообразного гелия в количестве G_k сжимается в компрессоре I до давления I и охлаждается в теплообменных аппаратах П-IV. После теплообменника IV часть гелия G_d направляется в поршневой детандер, где расширяется до давления обратного потока. Оставшаяся часть гелия $G_{др}$ после теплообменника VI дросселируется в вентиле Р-1 до промежуточного давления $p_{пр} = p_7$ и охлаждается в аппарате VII. После теплообменника VII гелиевый поток G_{p_2} дросселируется в вентиле Р-2 и полученная при этом парожидкостная смесь при давлении p_9 и температуре T_9 поступает к потребителю, где воспринимает подводимую теплоту Q и при давлении p_{10} и температуре T_{10} поступает в межтрубное пространство аппарата VII. Обратный поток проходит через теплообменный аппарат, нагревается до температуры T_1 , его количество измеряется с помощью диафрагмы XVI, и он направляется на всасывание в компрессор I. При наличии утечки гелия из системы часть гелия $G_{ут}$ добавляется на всасывание из газгольдера XVII.

В ванне III азот кипит при атмосферном давлении, его количество замеряется счетчиком XV, а расход азота, используемого в блоке осушки и очистки X, – с помощью счетчика XV.

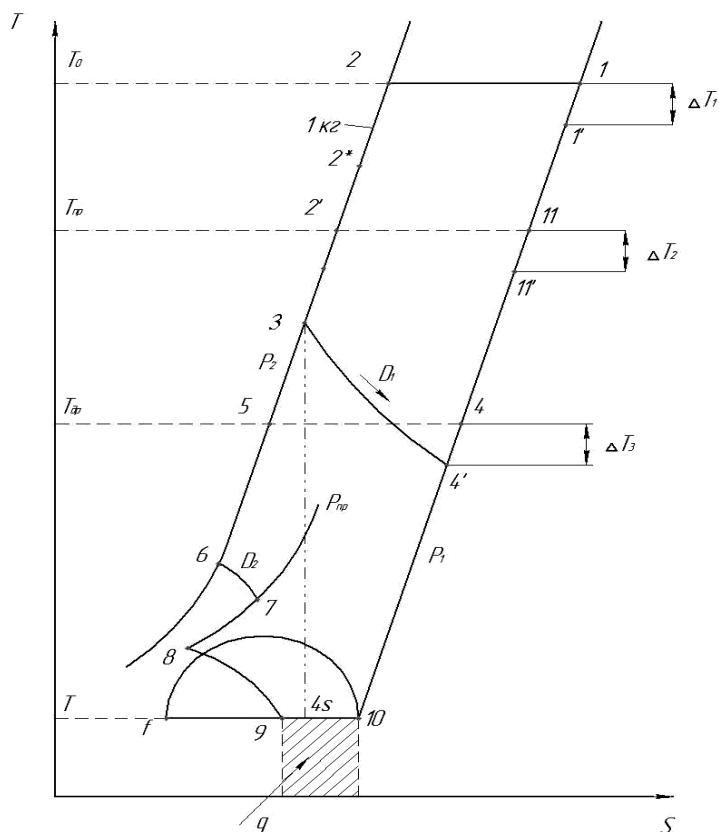


Рис. 4. Изменение параметров гелия при работе установки в рефрижераторном режиме

Задачи исследования

1. Ознакомиться с работой криогенной гелиевой установки КГУ-150/4,5 в рефрижераторном режиме.
2. Определить удельные материальные потоки в отдельных ступенях охлаждения.
3. Найти изоэнтропный КПД детандера.
4. Получить зависимость термодинамического КПД от тепловой нагрузки.
5. Определить удельные величины расхода энергии и жидкого азота в установке.

Примечания:

1. Испытание установки проводить при закрытом дроссельном вентиле Р-3 и выключенном нагревателе автоматического поддержания уровня жидкого гелия в сборнике VIII.
2. Тепловая нагрузка Q выбирается таким образом, чтобы температура рефрижераторного потока T_{10} была выше температуры насыщенных паров гелия при давлении p_{10} . По показаниям дифманометра диафрагмы определить количество обратного потока гелия – см. лабораторную работу 2, выражение (2).

Найти количество гелия, сжимаемого компрессором, кг/с,

$$G_k = G_{\text{обр}} + G_{\text{ут}}. \quad (40)$$

4. По значениям p_7 и температуре T_8 определить энтальпию гелия i_8 в кДж/кг, а по давлению p_{10} , и температуре T_{10} – энтальпию гелия i_{10} .
5. Определить количества гелия, проходящего через дроссельный вентиль Р-2, кг/с,

$$G_{\text{Р-2}} = G_{\text{др}} = \frac{Q}{(i_{10} - i_8)}. \quad (41)$$

6. Найти количество гелия, поступающего в дроссельную ступень, отнесенное к 1 кг сжимаемого гелия,

$$D_2 = \frac{G_{\text{др}}}{G_k}. \quad (42)$$

7. Количество гелия, расширенного в детандере, кг/с,

$$G_d = G_k - G_{\text{др}}, \quad (43)$$

или отнесенное к 1 кг сжимаемого гелия

$$D_1 = \frac{G_d}{G_k}.$$

8. По параметрам состояния гелия перед детандером (p_3, T_3) и после него (p'_{10}, T'_4) найти энтальпию (рис. 3, а) и определить изоэнтропный КПД детандера

$$\eta = \frac{i_3 - i_{4'}}{i_3 - i_{4s}}. \quad (44)$$

9. По показаниям счетчика XV определить расход жидкого азота G_A во внешней ступени охлаждения и рассчитать g_A (выражения (10)–(11)).

10. По показаниям счетчика XIV определить расход жидкого азота G'_A в блоке осушки и очистки гелия и рассчитать величину g'_A (выражения (12)–(13)).

11. Определить холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{Q}{N}, \quad (45)$$

где Q – холодопроизводительность, кВт; N – потребляемая мощность установки, кВт;

$$N = N_k + N_B + N_A - N_d, \quad (46)$$

где N_k – мощность, потребляемая компрессором, кВт; N_B – мощность, затрачиваемая на привод вакуум-насосов, кВт; N_A – мощность, затрачиваемая на получение жидкого азота, кВт,

$$N_A = (G_A + G'_A)l^{N_2},$$

где $l^{N_2} = 5370$ кДж/кг – расход энергии на получение жидкого азота [1], $N_d = G_d \cdot (i_3 - i_{4'})$ – мощность, возвращаемая детандером, кВт.

12. Найти холодильный коэффициент цикла Карно

$$\varepsilon_c = \frac{T}{(T_0 - T)}, \quad (47)$$

где T_0 – температура окружающей среды, К;

$T = \frac{T_9 + T_{10}}{2}$ – средняя температура криостатирования, К.

13. Рассчитать термодинамический КПД

$$\eta_t = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}. \quad (48)$$

14. Построить график зависимости

$$\eta_t = f(Q).$$

15. Для режима, имеющего максимальное значение термодинамического КПД, определить удельный расход энергии, кВт/кВт

$$l_0 = \frac{N}{Q}. \quad (49)$$

Отчет по лабораторной работе 3 оформить в соответствии с требованиями, изложенными в описании лабораторной работы 2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННОЙ ГЕЛИЕВОЙ УСТАНОВКИ, РАБОТАЮЩЕЙ В РЕФРИЖЕРАТОРНОМ РЕЖИМЕ С ИЗБЫТОЧНЫМ ОБРАТНЫМ ПОТОКОМ

Объект исследования

Принципиальная схема криогенной гелиевой установки представлена на рис. 2, а изменение параметров гелия в диаграмме $T-s$ – на рис. 5.

Перед началом испытаний гелиевой установки создается запас жидкого гелия, который находится в емкости XVIII. Для перевода установки с рефрижераторного режима работы на рефрижераторный режим с избыточным обратным потоком необходимо:

- выключить поршневой детандер;
- закрыть дроссельный вентиль Р-3;
- с помощью вентиля Р-1 и Р-2 отрегулировать давления гелиевого потока;
- открыть запорный вентиль 3-15 подачи гелия из емкости XVIII в сборник VIII;
- выключить электроподогреватель автоматического регулирования уровня жидкого гелия в сборнике VIII.

В установившемся режиме работы гелиевый поток в количестве G_k после теплообменника VII дросселируется вентилем Р-2, проходит через змеевик сборника гелия VIII и при давлении p_9 и температуре T_9

поступает к потребителю XIX, где воспринимает подводимую теплоту Q и при давлении p_{10}' и температуре T_{10} смешивается с паровым потоком $G_{изб}$, выходящим из сборника жидкого гелия. Избыточный поток $G_{изб}$ образуется в сборнике VIII за счет охлаждения прямого потока G_k и подвода теплоты Q' . Тепловой поток Q' создается с помощью регулятора электронагревателя XX автоматического поддержания уровня, переключенного на режим плавного регулирования подводимой мощности. Вентилем 3-15 обеспечивается поддержание уровня в сборнике VIII.

Образовавшийся обратный поток превышает прямой поток на величину $G_{изб}$, и после подогрева в аппаратах криогенной установки его количество измеряется с помощью диаграммы XVI. После диафрагмы гелиевый поток в количестве G_k поступает на всасывание в компрессор I, а избыточный поток $G_{изб}$ направляется в газгольдер XVII. Его количество замеряется по перемещению колокола газгольдера с учетом величины утечки гелия $G_{ут}$ в системе.

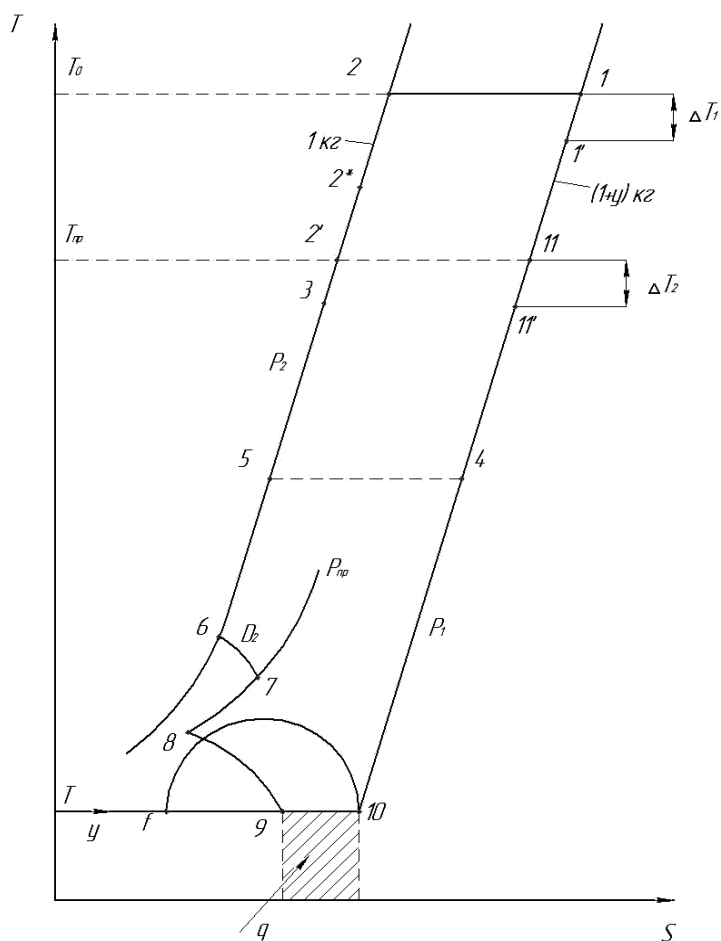


Рис. 5. Изменение параметров гелия при работе установки в рефрижераторном режиме с избыточным обратным потоком

Задачи исследования

1. Ознакомиться с работой криогенной гелиевой установки в рефрижераторном режиме с избыточным обратным потоком.
2. Определить значение эксергетического КПД [4].
3. Рассчитать удельные величины расхода энергии и жидкого азота.

Обработка результатов измерений

1. Определить по выражению (1) величину избыточного потока $G = G_{\text{изб}}$ [5].
2. Рассчитать по выражению (2) количество обратного потока $G_{\text{обр}} = G_{\text{к}} + G_{\text{изб}}$ и найти количество гелия, поступающего на всасывание в компрессор, кг/с,

$$G_{\text{к}} = G_{\text{обр}} - G_{\text{изб}}. \quad (50)$$

3. Определить относительную величину избыточного потока

$$y = G_{\text{изб}} / G_{\text{к}}. \quad (51)$$

4. По показаниям счетчика XV определить расход жидкого азота $G_{\text{А}}$ во внешней ступени охлаждения и рассчитать $g_{\text{А}}$ (выражения (10)–(11)).

5. По показаниям счетчика XIV определить расход жидкого азота $G'_{\text{А}}$ в блоке осушки и очистки гелия и рассчитать величину $g'_{\text{А}}$ (выражения (12)–(13)).

6. Определить значение эксергетического коэффициента полезного действия [3, 4] установки

$$\eta_e = \frac{Q[\tau_e] + Q'[\tau'_e]}{\frac{G_{\text{к}} \Delta c_p}{\eta_k} + \frac{G_{\text{изб}} e_f}{\eta_{\text{е}}^{\text{Г.ож}}} + \frac{(G_{\text{А}} + G'_{\text{А}}) e_{10}}{\eta_{\text{е}}^{\text{А.ож}}}}, \quad (52)$$

где Q – тепловая нагрузка потребителя, кВт; $[\tau_e] = \frac{T - T_0}{T}$ – эксерге-

тическая температурная функция; $T = \frac{T_9 - T_{10}}{2}$ – средняя температура термостатирования, К; T_0 – температура окружающей среды, К; Q' – дополнительная тепловая нагрузка, кВт; $[\tau_e'] = \frac{T_f - T_0}{T_f}$ – эксергетическая температурная функция; T_f – температура кипения гелия в сборнике VIII при p_{10}' , К; $\Delta e_p = e_2 - e_1$ – изменение эксергии потока гелия в компрессоре, кДж/кг; e_1 – эксергия потока гелия на входе в компрессор при p_1 и T_1 , кДж/кг; e_2 – эксергия потока гелия на выходе из компрессора при p_2 и T_2 , кДж/кг; e_f – эксергия потока жидкого гелия при p_{10}' и T_f , кДж/кг; e_{10} – эксергия потока жидкого азота при p_{10} и T_{10} , кДж/кг; $\eta_k = \eta_{из}$ – коэффициент полезного действия компрессора; $\eta_e^{\Gamma.ож} = 0,208$ – эксергетический КПД ожижителя гелия; $\eta_e^{А.ож} = 0,2$ – эксергетический КПД ожижителя азота.

7. Рассчитать удельные затраты энергии, кВт/кВт

$$l_o = \frac{N_k + N_B + N_{ож}^{He} + N_A}{Q + Q'}, \quad (53)$$

где N_k – мощность, потребляемая компрессором при сжатии гелия, кВт; N_B – мощность, затрачиваемая на привод вакуумных насосов, кВт; $N_{ож}^{He} = G_{изб} l_{ож}^{He}$ – затраты мощности на производство жидкого гелия, кВт; $l_{ож}^{He} = 3,276 \cdot 10^4$ – удельные затраты энергии на производство гелия [4], кДж/кг; $N_A = (G_A + G_A') l^{N_2}$ – затраты мощности на производство жидкого азота, кВт; $l^{N_2} = 5370$ – удельные затраты энергии на получение жидкого азота [1], кДж/кг,

8. Построить зависимости:

$$Q + Q' = f(y), \quad N = f(y), \quad \eta_e = f(y).$$

Теплофизические свойства гелия и азота для всех лабораторных работ находятся по источнику [6].

Отчет по лабораторной работе 4 оформить в соответствии с требованиями, изложенными в описании лабораторной работы 2.

Протокол

Номера измерений	Показания дифманометра диафрагмы h , мм вод.ст.	Время τ , с	Блок												
			Давление					Темпе							
			Обозначение манометра					Обозначение							
			М-1	М-2	М-3	М-4	М-5	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8
			Значение давления					Значение							
			p_2 , атм	p_3 , атм	p_9 , атм	p_{10} , атм	p_7 , атм	T_2 , °C	T_{4a} , °C	T_3 , °C	$T_{4'}$, К	T_{12} , К	T_9 , К	T_{10} , К	T_8 , К

Приложение

наблюдений

Барометрическое давление $B =$ _____
 Температура окружающей среды $T_0 =$ _____ К
 Утечки гелия из системы $G_{yt} =$ _____ кг/с

охлаждения					Газгольдер		Счетчик азота ХУ1			Счетчик азота ХУ			Мощность электропривода, кВт	Мощность привода вакуум-насосов, кВт
ратура					Показания, м ³	Давление, мм вод. ст.	Показания, м ³	Давление, мм вод. ст.	Температура, °С	Показания, м ³	Давление, мм вод. ст.	Температура, °С		
термометра														
T-9	T-10	T-11	T-12	T-13										
температуры														
$T_{2'}$, °С	$T_{11'}$, °С	T_5 , К	T_6 , К	$T_{1'}$, °С	V	p'_0	V_{2a}	p_{2a}	T_{2a}	V_{5a}	p_{5a}	T_{5a}	N_{Π}	$N_{\text{в}}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И.** Криогенные системы. Т. 2. Теория и расчет. – М.: Машиностроение, 1996. – 575 с.
2. Расчет криогенных установок / Л.А. Акулов, Е.И. Борзенко, С.С. Будневич, Г.А. Головкин; Под ред. С.С. Будневича. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. – 368 с.
3. Теплофизические свойства криопродуктов / Л.А. Акулов, Е.И. Борзенко, В.Н. Новотельнов, А.В. Зайцев. – СПб.: Политехника, 2001. – 243 с.
4. **Бродянский В.М., Семенов А.М.** Термодинамические основы криогенной техники. – М.: Энергия, 1980. – 448 с.
5. **Иньков А.Г., Коваленко В.Д., Морковкин И.М.** Анализ схем криогенных рефрижераторных установок с избыточным обратным потоком / Сб. науч. тр.: Процессы в криогенных установках и системах. – М.: НПО «Криогенмаш», 1981. – С. 14–22.
6. **Акулов Л.А., Борзенко Е.И., Зайцев А.В.** Теплофизические свойства и фазовое равновесие криопродуктов: Справочник. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2009. – 567 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ИЗУЧЕНИЕ КРИОГЕННОЙ ГЕЛИЕВОЙ УСТАНОВКИ КГУ-150/4,5	4
1. Техническая характеристика и технические данные установки ...	5
2. Описание технологической схемы установки	5
3. Устройство, работа и техническая характеристика составных частей установки	9
Требования к отчету по лабораторной работе	17
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННОЙ ГЕЛИЕВОЙ УСТАНОВКИ КГУ-150/4,5, РАБОТАЮЩЕЙ В ОЖИЖИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ	19
Объект исследования	19
Содержание работы	20
Обработка результатов измерений	21
Отчет по работе	26
Техника безопасности	26
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННОЙ ГЕЛИЕВОЙ УСТАНОВКИ КГУ-150/4,5, РАБОТАЮЩЕЙ В РЕФРИЖЕРАТОРНОМ РЕЖИМЕ	26
Объект исследования	26
Задачи исследования	28
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННОЙ ГЕЛИЕВОЙ УСТАНОВКИ, РАБОТАЮЩЕЙ В РЕФРИЖЕРАТОРНОМ РЕЖИМЕ С ИЗБЫТОЧНЫМ ОБРАТЫМ ПОТОКОМ	30
Объект исследования	30
Задачи исследования	32
Обработка результатов измерений	32
ПРИЛОЖЕНИЕ. Протокол наблюдений	34
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	36



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



Институт холода и биотехнологий является преемником Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУНиПТ), который в ходе реорганизации (приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 2209 от 17 августа 2011г.) в январе 2012 года был присоединен к Санкт-Петербургскому национальному исследовательскому университету информационных технологий, механики и оптики.

Созданный 31 мая 1931года институт стал крупнейшим образовательным и научным центром, одним из ведущих вузов страны в области холодильной, криогенной техники, технологий и в экономике пищевых производств.

В институте обучается более 6500 студентов и аспирантов. Коллектив преподавателей и сотрудников составляет около 900 человек, из них 82 доктора наук, профессора; реализуется более 40 образовательных программ.

Действуют 6 факультетов:

- холодильной техники;
- пищевой инженерии и автоматизации;
- пищевых технологий;
- криогенной техники и кондиционирования;
- экономики и экологического менеджмента;
- заочного обучения.

За годы существования вуза сформировались известные во всем мире научные и педагогические школы. В настоящее время фундаментальные и прикладные исследования проводятся по 20 основным научным направлениям: научные основы холодильных машин и термотрансформаторов; повышение эффективности холодильных установок; газодинамика и компрессоростроение; совершенствование процессов, машин и аппаратов криогенной техники; теплофизика; теплофизическое приборостроение; машины, аппараты и системы кондиционирования; хладостойкие стали; проблемы прочности при низких температурах; твердотельные преобразователи энергии; холодильная обработка и хранение пищевых продуктов; тепломассоперенос в пищевой промышленности; технология молока и молочных продуктов; физико-химические, биохимические и микробиологические основы переработки пищевого сырья; пищевая технология продуктов из растительного сырья; физико-химическая механика и тепло-и массообмен; методы управления технологическими процессами; техника пищевых производств и торговли; промышленная экология; от экологической теории к практике инновационного управления предприятием.

В институте создан информационно-технологический комплекс, включающий в себя технопарк, инжиниринговый центр, проектно-конструкторское бюро, центр компетенции «Холодильщик», научно-образовательную лабораторию инновационных технологий. На предприятиях холодильной, пищевых отраслей реализовано около тысячи крупных проектов, разработанных учеными и преподавателями института.

Ежегодно проводятся международные научные конференции, семинары, конференции научно-технического творчества молодежи.

Издаются журнал «Вестник Международной академии холода» и электронные научные журналы «Холодильная техника и кондиционирование», «Процессы и аппараты пищевых производств», «Экономика и экологический менеджмент».

В вузе ведется подготовка кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре по 11 специальностям.

Действуют два диссертационных совета, которые принимают к защите докторские и кандидатские диссертации.

Вуз является активным участником мирового рынка образовательных и научных услуг.

www.ihbt.edu.ru
www.gunipt.edu.ru

Борзенко Евгений Иванович

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
РЕФРИЖЕРАТОРА-ОЖИЖИТЕЛЯ
НА КРИОГЕННОЙ ГЕЛИЕВОЙ УСТАНОВКЕ
КГУ-150/4,5**

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Компьютерная верстка
Д.Е. Мышковский

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

Подписано в печать 09.06.2014. Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л. 2,33. Печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,25

Тираж 150 экз. Заказ № С 24

НИУ ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
ИИК ИХиБТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Санкт-Петербургский национальный исследова-
тельный университет
информационных технологий,
механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
Институт холода и биотехнологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

