электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

 # 02, февраль 2016

УДК 621.521

Исследование процесса вакуумной откачки паров насыщенного азота с целью получения температур на уровне 63 – 77 К

Журлова П.Ю., *студентка*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения»

Губин М.В., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения»

Научный консультант: ***Куприянов М.Ю.***, *аспирант*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения»

Научный руководитель: ***Бондаренко В.Л.***, *зав. каф. Э-4, д.т.н., профессор*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения»
crio@power.bmstu.ru

Вакуумная откачка паров кипящей жидкости реализуется с помощью вакуумных насосов различных типов. За счет теплоты парообразования и понижения давления вакуумным насосом, температура оставшейся жидкости и стенок сосуда понижается. Равновесие наступает при понижении давления до момента, когда уменьшение энергии компенсируется внешним теплопритоком, т. е. прекращение охлаждения.

Для тепловой стабилизации в области весьма низких температур применяется криостат. Это аппарат, во внутреннем объеме которого может долгое время поддерживаться низкая температура для проведения физических экспериментов, хранения криогенных жидкостей и т.д. В таких термостатах реализуются различные типы изоляций, которые уменьшают величину теплопритоков из окружающей среды. Криостаты применяются для поддержания определенной температуры, а также для обеспечения ряда ее постоянных значений в заданном диапазоне.

В данной статье рассматривается криостат типа КГ-15/150-1, внешний вид которого представлен на рис. 1. Такие криостаты предназначены для проведения экспериментов при температуре жидкого гелия.



Рис. 1. Внешний вид криостата типа КГ-15/150-1

Как видно из рис. 2 гелиевый криостат – сосуд с широкой горловиной и экраном, охлаждаемым парами гелия, погружен в азотный сосуд таким образом, что вакуумный кожух гелиевого сосуда является экраном, охлаждаемым жидким азотом. Изоляция азотного сосуда – вакуумно-многослойная, изоляция гелиевого сосуда – высоковакуумная. В изоляции этого типа конвективный теплообмен устраняют вакуумированием. Теплопередача происходит только лучеиспусканием и теплопроводностью остаточных газов [1]. На крышке криостата расположены выводные штуцера для залива гелия и азота, а также для отвода их паров. Для удобства перемещения криостата предусмотрены три поворотных колеса.

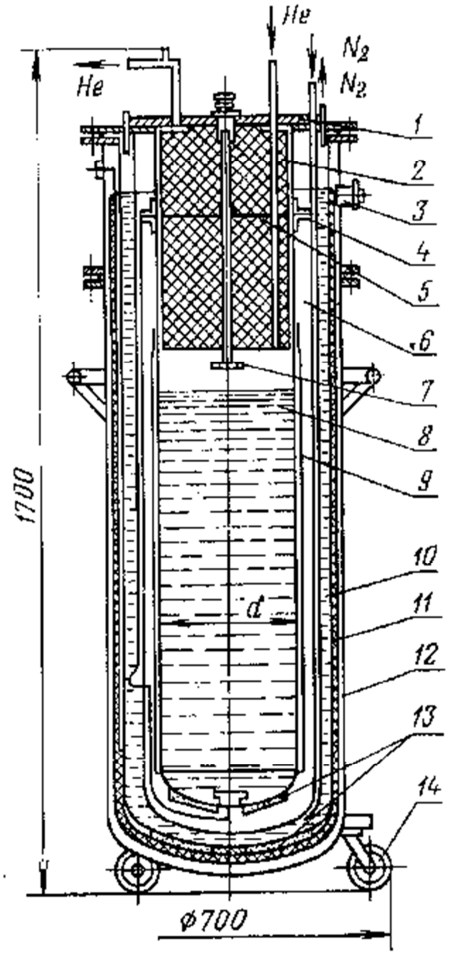


Рис. 2. Схема криостата типа КГ-15/150-1:

1 – крышка; 2 – пенопластовая пробка; 3 – клапан вакуумирования; 4 – труба залива азота; 5 – контактное кольцо; 6 –вакуумный кожух гелиевого сосуда; 7 – фланец; 8 – гелиевый сосуд; 9 – экран; 10 – азотный сосуд; 11 – вакуумно-многослойная изоляция; 12 – кожух; 13 – адсорбент; 14 – колесо

Техническая характеристика криостата типа КГ.

Показатель	КГ-15/150-1
Код ОКП	36 4238 3113
Объем, л: гелиевого сосуда азотного сосуда	 15 13
Потери от испарения, кг/ч: гелия азота	 0,0044 0,3

Температура окружающего воздуха, К	233 – 313
Габаритные размеры, мм: диаметр кожуха диаметр кольцевого поручня высота диаметр горловины гелиевого сосуда d, мм	 310 700 1700 150
Масса порожнего криостата, кг	80

В данной статье представлен расчет криостата и вакуумной системы при отсутствии гелиевого сосуда. Схема установки представлена на рис. 3. В состав установки входят: криостат типа КГ-15/150-1 с залитым в него жидким азотом на половину объема, вакуумный насос объемного действия NV, вакуумметры PT1, PT2, вакуумный вентиль VT, вакуумная арматура, температурные датчики, электронные преобразователи.

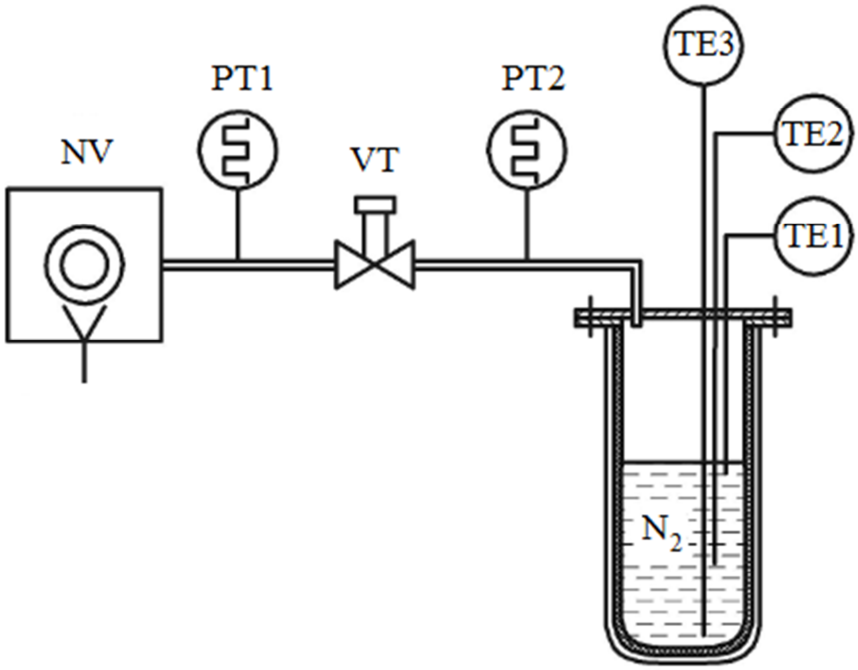


Рис. 3. Схема эксперимента

В ходе расчета была определена зависимость понижения температуры при откачке паров от изменения массы жидкости в условиях отсутствия внешних теплопритоков. Ниже приведены результаты расчета в дифференциальной и интегральной формах (формулы (1) и (2) соответственно) и их сравнение [2].

$$\Delta T_{\text{диф}} = -\frac{r}{c_{\text{ж}}} \ln \frac{c_{\text{ж}}(1-\Delta\bar{m}) + c_{\text{ст}}\bar{m}_{\text{ст}}}{c_{\text{ж}} + c_{\text{ст}}\bar{m}_{\text{ст}}}, \qquad (1)$$

где r – скрытая теплота испарения жидкости, $c_{ж}$ – средняя теплоемкость жидкости, $c_{ст}$ – средняя теплоемкость стенок сосуда, - $\Delta\bar{m} = \frac{\Delta m}{m_{н}}$ – отношение изменения откачиваемой массы жидкости к начальной массе жидкости, $\Delta\bar{m}_{ст} = \frac{m_{ст}}{m_{н}}$ – отношение масс стенок сосуда и жидкости.

$$\Delta T_{инт} = -\frac{r\Delta\bar{m}}{c_{ст}\bar{m}_{ст} + c_{ж}\left(1 - \frac{\Delta\bar{m}}{2}\right)}. \qquad (2)$$

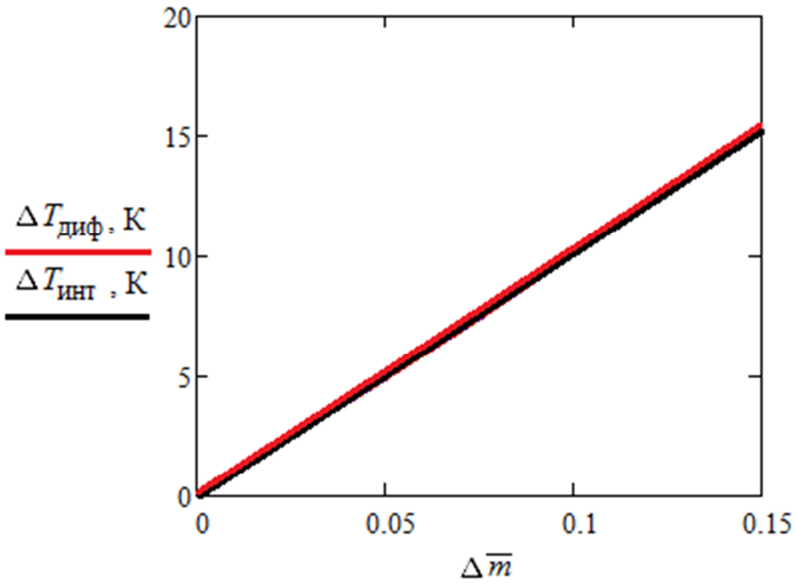


Рис. 4. График изменения температуры в зависимости от доли откаченной жидкости

Как видно из рис. 4 при доле испарившейся жидкости от 0 до 15 % кривые зависимостей изменения температур в дифференциальной и интегральной формах от изменения массы жидкости практически совпадают. Достижение температуры тройной точки азота (T = 63,151 К) [3], наступает при откачке ~ 15 % жидкости.

Чтобы подобрать вакуумный насос необходимо сравнить его производительность с объемным расходом испаряющейся жидкости от теплопритоков. Нельзя допустить, чтобы скорость испарения от теплопритоков превысила скорость откачки паров. Из характеристик криостата следует, что потери от испарения азота вследствие внешних теплопритоков составляют $\Delta m_{т} = 0{,}3$ кг/ч. Ниже представлены полученные в ходе расчета зависимости температур, давлений и плотностей паров азота при изменении массы жидкости от 0 до 15 %.

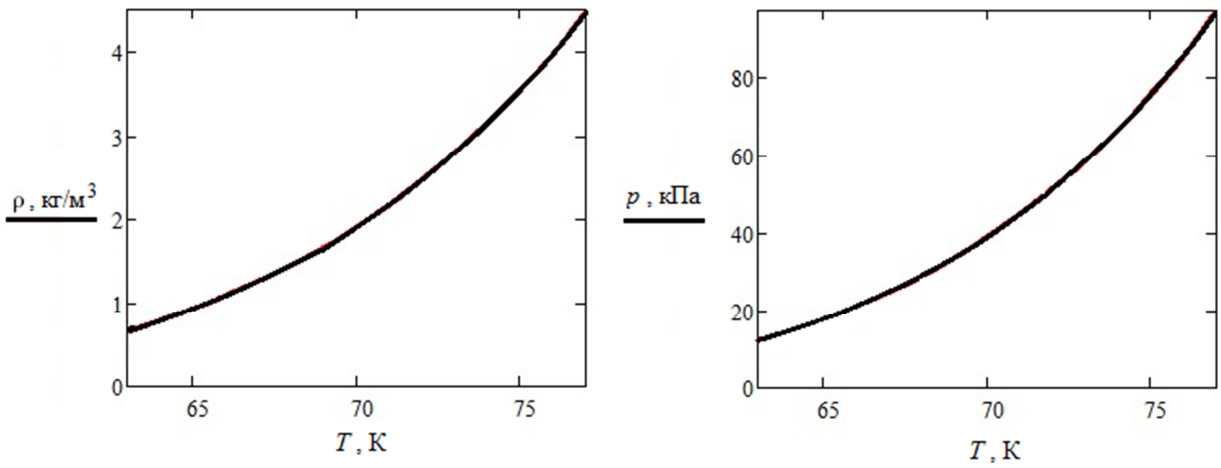


Рис. 5. Графики изменения плотности и давления насыщенного пара в зависимости от температуры

Скорость испарения от теплопритоков находится по формуле (3):

$$V_{\text{исп}} = \frac{\Delta m_{\text{т}}}{\rho}, \tag{3}$$

где $\rho -$ плотность пара.

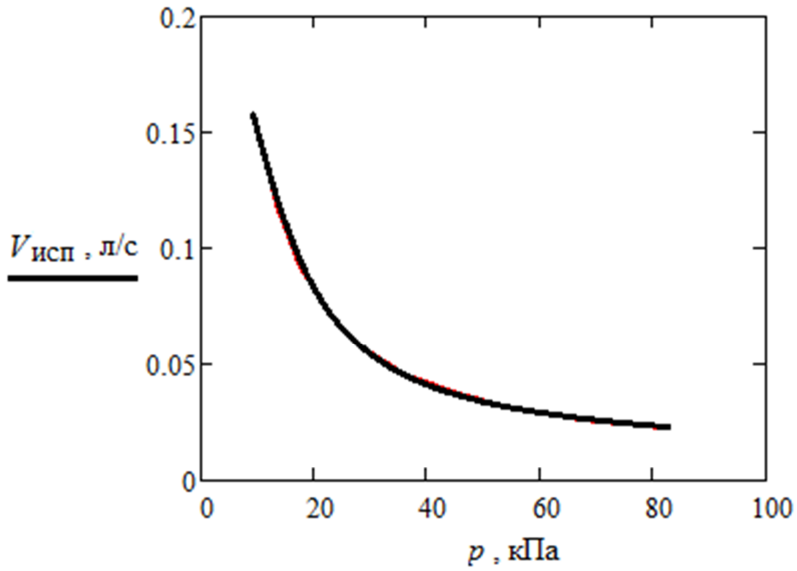


Рис. 6. График изменения скорости испарения от теплопритоков в зависимости от давления пара

Как видно из рис. 5 минимальное давление, которого мы можем достигнуть в процессе откачки равно 13 кПа, что относится к низкому вакууму (диапазон 1 – 100 кПа). Следовательно, целесообразно использовать механический насос объемного действия, например, пластинчато-роторный. По рис. 7 был выбран насос 2НВР-5ДМ.

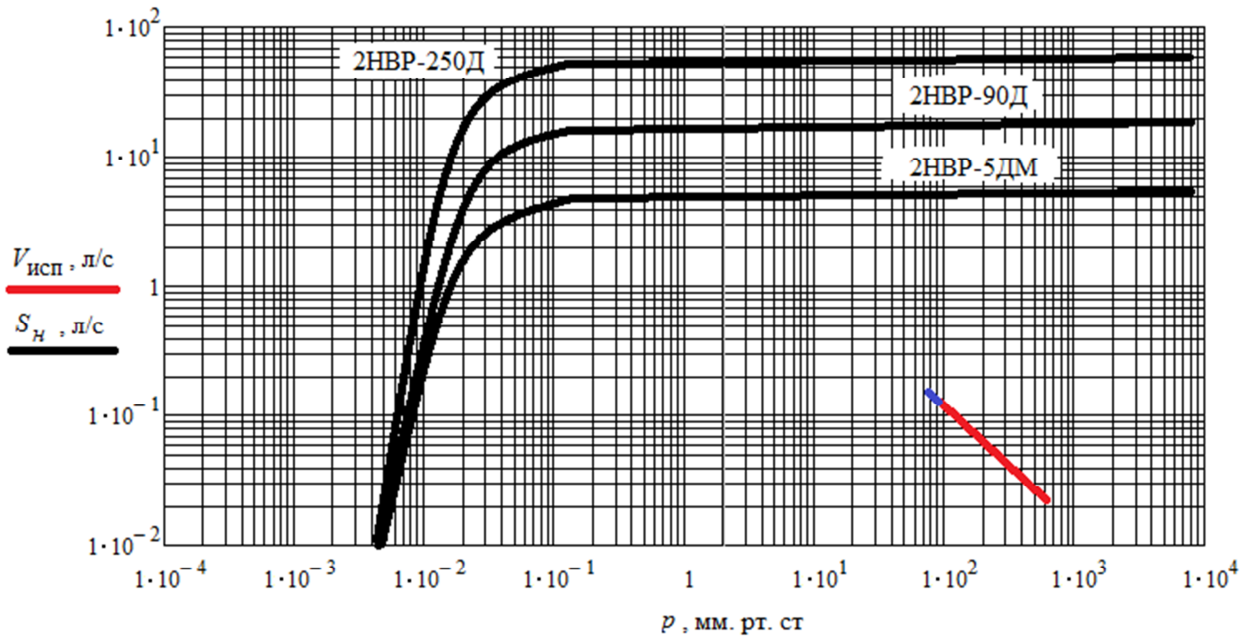


Рис. 7. График зависимости скорости испарения и быстроты действия насосов серии НВР в зависимости от давления пара

Кроме того, понижение температуры жидкого азота ниже 63,151 К приводит к его переходу в твердую фазу, что категорически запрещается при использовании вакуумного насоса, т.к. это может привести к разрушению криостата и поломке вакуумного насоса. Для предотвращения выпадения азота в твердую фазу применяют следующие меры: ставят термометры равномерно по высоте столба жидкости в криостате, контролируя температуру, монтируют вентиль на линию откачки, который можно прикрыть при приближении к тройной точке азота. Этот момент отображен на рис. 7: понижение давления ниже 96,25 мм рт. ст. (12,83 кПа, которое соответствует температуре тройной точки азота 63,151 К) показано синим цветом. Как видно из рис. 7 для насоса этого типа и выбранного криостата рассматриваемый случай (пересечение скорости испарения и производительности насоса) невозможен.

Для определения проводимости вакуумной системы необходимо определиться с характером течения. Низкому вакууму соответствует ламинарный режим течения (числа Кнудсена $Kn < 0{,}01$). В этом случае используется формула (4), по которой рассчитывается пропускная способность системы U, определяемая как отношение количества протекающего газа Q к разности давлений Δp:

$$U = \frac{Q}{\Delta p} = \frac{GRT}{\Delta p}\,. \qquad (4)$$

Поток Q выражается в единицах pV, где V – объемный расход газа, p – давление в точке, соответствующей расходу. Связь между массовым расходом газа G и падением давления Δp для ламинарного непрерывного потока в круглой трубе дается уравнением Пуазейля, которое представлено формулой (5):

$$\Delta p = \frac{64}{Re} \cdot \frac{\omega^2 \rho}{2} \cdot \frac{L}{D} = \frac{128 \mu G}{\pi \rho} \cdot \frac{L}{D^4}, \qquad (5)$$

где μ – вязкость, Па·с;

L – длина канала, м;

D – его диаметр, м;

$G = \omega \rho \cdot \frac{\pi D^2}{4}$ – массовый расход газа, кг/с.

Подставляя это выражение в уравнение (4) и имея в виду, что плотность $\rho = \frac{p}{RT}$, кг/м^3, получим

$$G = \frac{\pi p}{128 \mu} \cdot \frac{D^4}{L}. \qquad (6)$$

Обычно в формуле (6) используется $p_{\text{ср}}$. Характерные размеры нашей вакуумной арматуры: D = 16 мм. L = 2000 мм. Тогда зависимость проводимости вакуумной системы от давления будет выглядеть следующим образом:

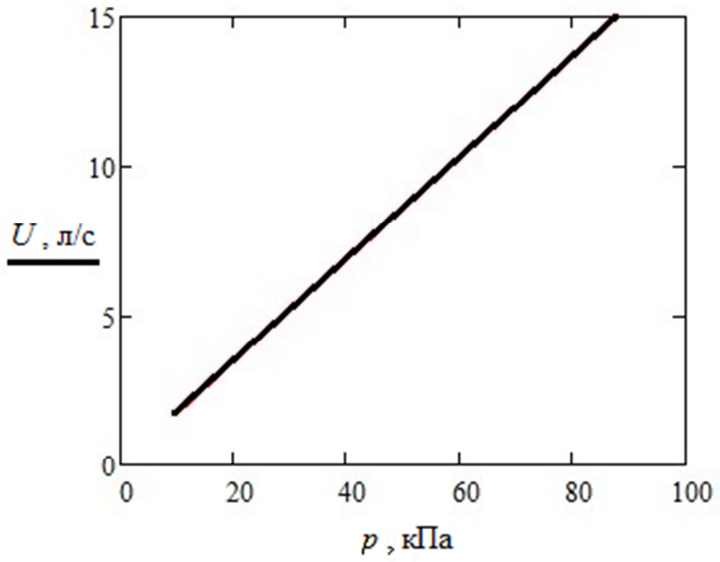


Рис. 8. График изменения проводимости вакуумной системы от давления

Эффективная скорость откачки паров азота определяется из основного уравнения вакуумной техники, представленного формулой (7):

$$S = \frac{S_{\text{н}} U}{S_{\text{н}} + U}, \tag{7}$$

где $S_{\text{н}}$ – производительность насоса по паспортным данным, $S_{\text{н}} = 5{,}5$ л/с.

Тогда зависимость быстроты откачки от давления выглядит как на рис. 9.

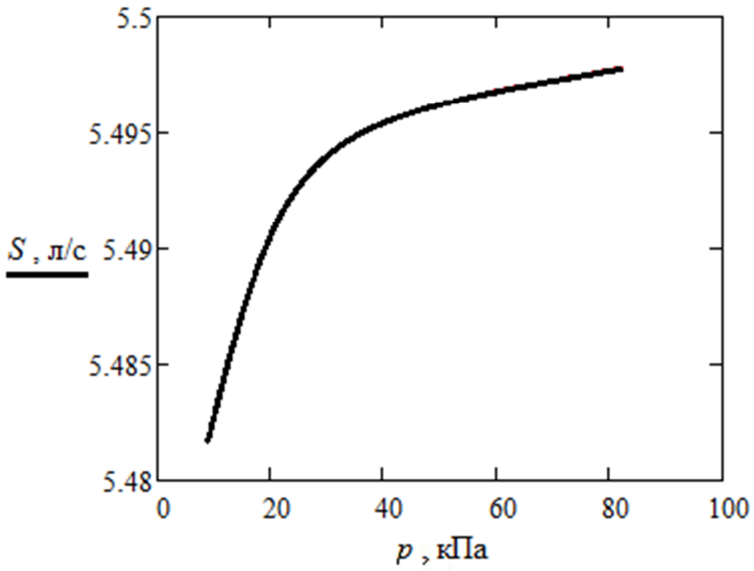


Рис. 9. График изменения эффективной скорости откачки в зависимости от давления

В будущем планируется провести эксперимент. Целью эксперимента является получение низких температур на уровне 63-77 К с помощью вакуумной откачки паров насыщенного азота. Также планируется получить экспериментальные зависимости скорости испарения от теплопритоков, определить эффективную скорость откачки вакуумной системы и проверить правильность подбора насоса по производительности, построить реальную откачную характеристику насоса.

В процессе эксперимента будут регистрироваться следующие показания приборов:

- температуры внутри криостата с помощью термометров сопротивления, размещенных по высоте азотного сосуда;
- давление на линии откачки с помощью вакуумного датчика Пирани.

Список литературы

[1]. Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники / под ред. М.П. Малкова. М.: Энергоатомиздат, 1985. 432 с.

[2]. Архаров А.М., Архаров И.А., Тычкова С.О. К задаче об изменении температуры криогенных жидкостей при откачке их паров и хранении // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. Спец. вып. «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» С. 41-46.

[3]. Криогенные системы: Учебник для студентов вузов по специальности «Техника и физика низких температур»: В 2 т. Т. 1. Основы теории и расчета / А.М. Архаров, И.В. Марфенина, Е.И. Микулин. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1996. 576 с.