

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ ПАРОВ ЖИДКОГО АЗОТА

А.А. Усцов

uscov.1998@mail.ru

М.Ю. Куприянов

kupriyanov.m@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проведены необходимые теоретические расчеты для моделирования процесса откачки насыщенных паров жидкого азота с учетом принятых допущений. Приведена схема экспериментального стенда. Описана последовательность проведения эксперимента. Проверена правильность подбора сосуда Дьюара и вакуумного насоса объемного действия для обеспечения необходимого уровня разрежения над зеркалом жидкого азота. Собран стенд и проведен эксперимент, в рамках которого выполнено термостатирование в диапазоне от 63 до 77 К, а также осуществлен фазовый переход азота из жидкого состояния в твердое. Вычислена масса испарившегося азота, необходимая для достижения температуры его тройной точки. Рассчитана эффективная скорость откачки системы с учетом проводимости отдельных элементов. Определено необходимое минимальное время откачки паров. Представлены зависимости температуры и давления в системе с течением времени. Описана возможная модернизация экспериментальной установки — внедрение дополнительных центров кристаллизации и учет массы жидкого азота с помощью электронных весов

Ключевые слова

Термостатирование, вакуумирование, экспериментальный стенд, сосуд Дьюара, фазовый переход

Поступила 26.06.2019

Принята 20.01.2020

© Автор(ы), 2020

Введение. В современной криогенной технике в качестве хладагента широко используется жидкий азот: он имеет низкую стоимость по сравнению с другими хладагентами ввиду легкости его получения, нетоксичен, взрывобезопасен, а также позволяет получить температуру охлаждаемого объекта примерно 77 К [1, 2]. Однако некоторые электронные приборы, например датчики на орбитальных станциях, ограничители тока, лучше работают при более низких температурах [3–5]. Тогда возникает вопрос,

как получить и поддерживать значения температуры менее 77 К? Один из наиболее простых и популярных способов — вакуумная откачка паров жидкого азота [6, 7].

Материалы, методы и оборудование. В работе [8] приведены теоретические расчеты криостата и его вакуумной системы, отображены значения температуры, давления, а также необходимой доли испарившейся жидкости для достижения температур от 63 до 77 К. Доказана возможность проведения эксперимента. Следует отметить, что не был проведен сам эксперимент, следовательно, отсутствовала зависимость скорости испарения от теплопритоков в систему, не проверена правильность подбора вакуумного насоса по производительности, поскольку не отображена реальная быстрота откачки системы. Для достижения поставленной задачи разработан и сконструирован стенд для вакуумной откачки паров насыщенного азота и определено время откачки той массы испарившейся жидкости, которая позволит понизить температуру азота до соответствующего значения.

Стенд позволяет воссоздать и поддерживать температурный диапазон от 63 до 77 К. В частности, он создает необходимое разрежение в системе, способствующее достижению температуры тройной точки азота (63 К). Принципиальная схема стенда приведена на рис. 1. В отличие от [8] для вакуумирования использовался сосуд Дьюара 2.

Основные характеристики сосуда Дьюара: внешний и внутренний диаметры колбы 70 и 49 мм; высота сосуда 250 мм; высота внутренней колбы 220 мм; объем внутренней колбы 400 мл. Выбор данного лабораторного сосуда обуславливается низкой ценой, наглядностью (прозрачные стеклянные стенки позволяют наблюдать за происходящим процессом), малыми габаритными размерами.

Необходимое разрежение в системе создается вакуумным насосом 16, который соединен с сосудом с помощью вакуумной и криогенной арматуры 5–7, 9–11, 13–15, 18, 22 и 23. Данные о параметрах в рабочем объеме (400 мл) с залитым в него жидким азотом 3 (300 мл) снимаются с помощью регистраторов (термометров сопротивления 4, вакуумметра 12 Пирани и измерительной линейки 21). Для фиксации оборудования используются штатив 1, трубки 17 и крепежные изделия 19, 20.

Точке начала кристаллизации азота соответствуют значения температуры 63 К и давления 12,5 кПа [1, 2]. Для создания такого разрежения выбран вакуумный пластинчато-роторный масляный насос 2НВР-5ДМ [9–11], откачная характеристика которого приведена на рис. 2.

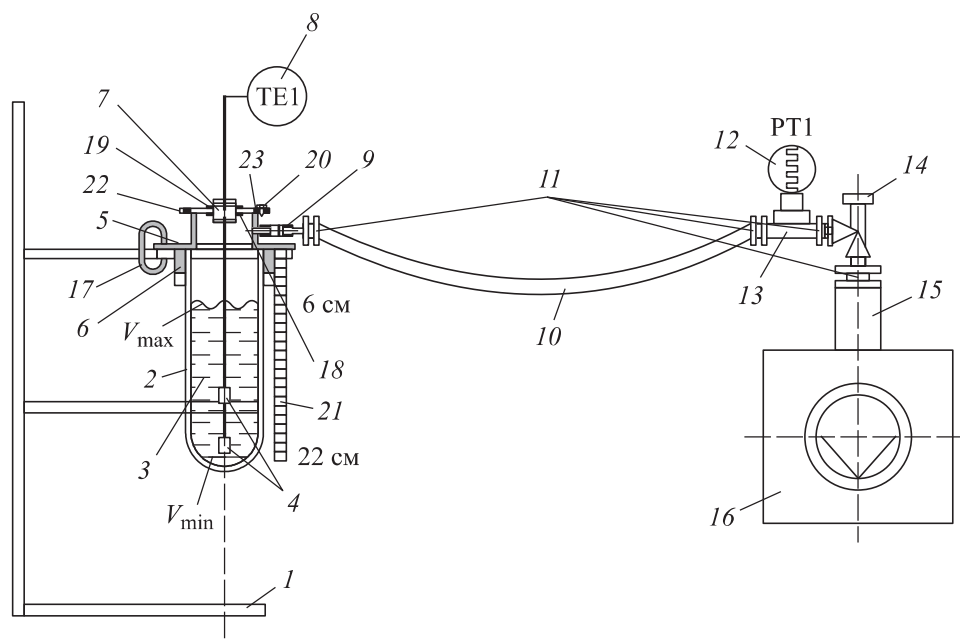


Рис. 1. Схема стенда:

1 — крепежный штатив; 2 — сосуд Дьюара; 3 — жидкий азот; 4 — термодатчики (нижний и верхний); 5 — фланец; 6, 18, 23 — резиновые прокладки; 7 — герморазъем; 8 — регистратор температуры; 9 — резиновый шланг; 10 — гибкий вакуумпровод; 11 — штуцеры; 12 — вакуумметр Пирани; 13 — тройник; 14 — угловой ручной клапан; 15 — трубка; 16 — вакуумный насос; 17 — струбцина; 19 — гайка; 20 — крепежный болт; 21 — линейка; 22 — крышка фланца

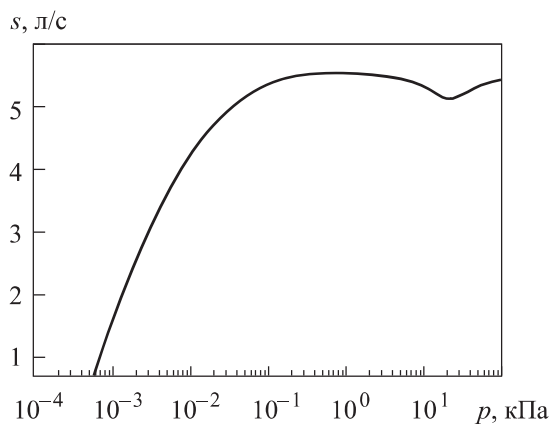


Рис. 2. Откачная характеристика

Основные характеристики насоса 2НВП-5ДМ, согласно рис. 2 и [9], следующие: быстрота действия на входе 5,5 л/с (в диапазоне давлений от атмосферного до 0,26 кПа); предельное остаточное давление 0,66 Па; объем откачиваемого сосуда не более 3,5 м³; мощность электродвигателя 0,55 кВт;

диаметр условного прохода входного/выходного патрубков 25 мм. Чтобы убедиться в правильности выбранного насоса, необходимо его производительность сравнить с объемным расходом испаряющейся жидкости, последний не должен превышать производительность самого насоса.

Уточненная математическая модель и допущения. В построенной оценочной модели использован ряд следующих допущений. Изменение температуры и объемного расхода паров в сильфоне, а также процесс охлаждения масла в насосе и температура паров на всасывающем патрубке насоса не учитывались. Допустимый объем наполнения сосуда 2 жидким азотом равен 300 мл, что соответствует массе 242 г и отметке 6 см на измерительной шкале 21. Это связано с тем, что часть сосуда не видна при проведении эксперимента (см. рис. 1). В ходе расчетов определена зависимость понижения температуры при откачке паров от изменения массы жидкости по формуле [12]:

$$\int_{G_0}^G dG = \int_{T_0}^T \frac{c}{r} dT, \quad (1)$$

где G_0 , G — начальная и текущая масса жидкости; T_0 , T — начальная и текущая температуры жидкости; c — теплоемкость жидкости; r — скрытая теплота парообразования. Тогда, интегрируя (1), получаем

$$G = \frac{G_0}{\exp\left[\frac{c}{r} \Delta T\right]}. \quad (2)$$

Пользуясь итерационным методом, согласно методике, по формуле (2) вычисляем итоговое значение испарившейся жидкости [13]. В результате имеем, что достаточно испарить 13 % жидкого азота при адиабатных условиях, чтобы достичь температуры 63 К, однако из-за наличия теплопритоков из окружающей среды данное число возрастет от 10 до 20 % [12, 14]. Сославшись на [12], примем усредненное значение 15 %. С учетом приведенного получаем, что необходимо испарить 28 % жидкости, в нашем случае 68 г. Для определения времени откачки необходимого объема насыщенных паров азота используем следующую формулу [10, 11]:

$$\Delta t = \frac{V_{\text{отк}}}{S_{\text{эф}}} \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right), \quad (3)$$

где $V_{\text{отк}} = m_0\theta / \rho_{\text{сп}}$ — откачиваемый объем насыщенных паров массой $m_0\theta$ ($m_0 = 242$ г — начальная масса жидкости, $\theta = 0,28$ — доля необхо-

димой для испарения жидкости) со средней плотностью $\rho_{\text{ср}} = 2,64$ г/л (вычислялась как средняя интегральная при изменении давления от p_1 до p_2); $S_{\text{эф}}$ — эффективная скорость откачки паров вакуумным насосом с учетом всех дополнительных расходов; p_1 и p_2 — начальные и конечные давления откачки.

Отметим, что формула (3) справедлива при изотермических процессах при откачке замкнутых объемов с постоянной быстротой действия во всем диапазоне изменения давления в откачиваемом объеме. Однако, согласно [10], скорость откачки слабо меняется в диапазоне давления 10...760 торр, поэтому ее можно считать постоянной. Влияние изменения температуры учитывалось изменением плотности паров.

В дополнение выполнен расчет проводимости системы без учета теплопритоков к арматуре: для каждого элемента вакуумпровода рассчитывается параметр L/D (отношение длины вакуумпровода к диаметру поперечного сечения) и его проводимость U по следующей формуле [11, 15]:

$$U_i = 1,2 \cdot 10^4 \frac{D^3}{L} (15,6 D p_{\text{ср}} + 0,19), \quad (4)$$

где $p_{\text{ср}}$ — среднее интегральное давление; L — длина вакуумпровода ($L/D > 20$, $L = L + 1,33D$ — длинная труба, $2 < L/D < 20$ — короткая труба); D — диаметр поперечного сечения.

Отметим, что по формуле (4) проводимости отдельных элементов системы зависят от давления внутри них. Для упрощения расчета принято решение использовать среднее интегральное давление $p_{\text{ср}}$ в диапазоне понижения давления от p_1 до p_2 [10]. Поправка эффективной длины позволяет с удовлетворительной точностью рассчитать проводимость коротких трубопроводов [9, 10].

Расчет полной проводимости вакуумпровода [9–11, 15] выполнен по формуле

$$U_{\Sigma} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{U_i} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Эффективную скорость откачки $S_{\text{эф}}$ объема через вакуумпровод можно рассчитать, используя основное уравнение вакуумной техники:

$$S_{\text{эф}} = \frac{S_{\text{н}} U_{\Sigma}}{S_{\text{н}} + U_{\Sigma}}, \quad (6)$$

где S_n — производительность насоса с учетом всех дополнительных газовых притоков. Время откачки определяли по формуле (3). Кратко алгоритм проведения эксперимента можно представить следующим образом.

Этап 1. Проверить предельное остаточное давление вакуумного насоса 16 работой «сам на себя».

Этап 2. Провести серию экспериментов с пустым сосудом Дьюара 2 (откачать всю систему, чтобы проверить ее на наличие негерметичностей и, если необходимо, ликвидировать их).

Этап 3. Налить в сосуд Дьюара 2 жидкий азот объемом 300 мл и оставить сосуд открытым на атмосферу. Определить расход паров азота за счет теплопритоков.

Этап 4. Закрыть угловой клапан 14; включить вакуумный насос 16; в сосуд Дьюара поместить два датчика температуры на разных уровнях; налить жидкий азот объемом 300 мл; плавно открывая клапан 14, привести систему к рабочему режиму. Откачивать пары, снимая данные с 4 и 15, а также считывать объем жидкости в сосуде. Откачивать систему вплоть до остановки фиксации понижения давления.

Отметим, что в качестве датчиков температуры использовались платиновые терморезисторы РТ100, способные работать в интервале температур от 30 до 873 К. Также использовался вторичный прибор контроля температуры 7. Давление в системе определялось с помощью вакуумметра Пирани 12, диапазон измеряемых давлений которого от 1 атм до 10^{-3} мбар с погрешностью 15 % при давлении менее 100 мбар. Собранный стенд показан на рис. 3. После проведения этапа 1 эксперимента выявлено, что пре-

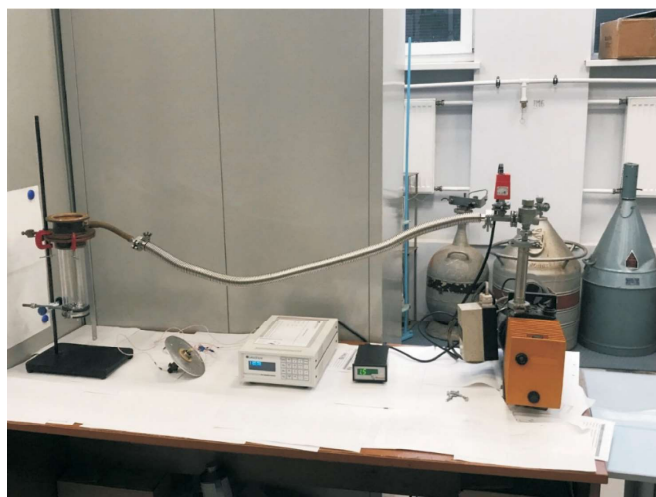


Рис. 3. Собранный экспериментальный стенд

дельное остаточное давление при работе вакуумного насоса «сам на себя» составило 0,25 Па (по паспорту 0,66 Па), следовательно, характеристика насоса удовлетворительна.

Результаты. Этап 3 показал, что весь налитый объем жидкого азота испарился за 1 ч 15 мин, массовый расход азота составил $m_Q = 0,231$ г/ч.

График зависимости скорости откачки системы от давления (рис. 4) построен с учетом производительности вакуумного насоса S_H , объемного расхода паров азота $V_{исп}$ и притоков газа из атмосферы в связи с наличием негерметичностей $V_{пр}$.

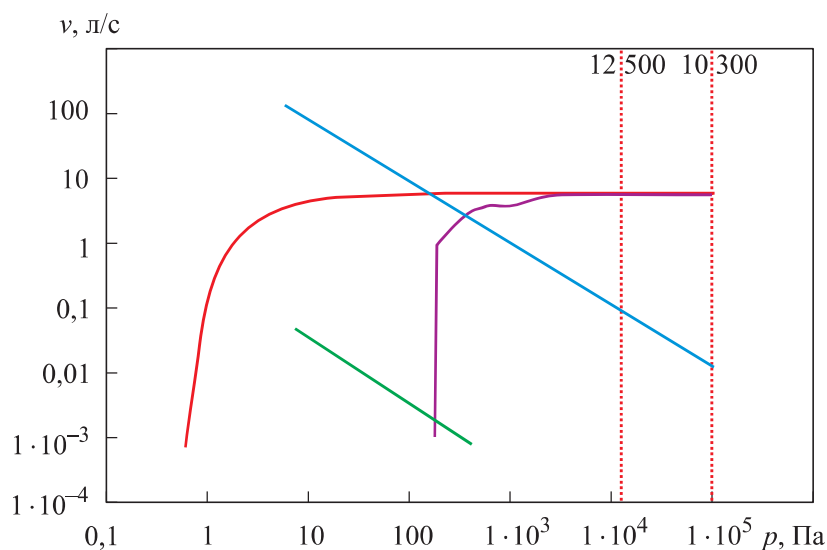


Рис. 4. Скорость откачки паров в зависимости от давления в системе (красная линия — S_H ; голубая — $V_{исп}$; зеленая — $V_{пр}$; бордовая — $S_{эф}$)

Из рис. 4 следует, что газовые притоки вследствие наличия негерметичностей несущественны, поэтому ими можно пренебречь. Отметим, что теоретически предельное остаточное давление в системе составляет 370 Па (абсцисса точки пересечения производительности насоса S_H и объемного расхода азота $V_{исп}$), производительность насоса составляет $S_H = 5,46$ л/с. Данные по расчету проводимости элементов в системе представлены в табл. 1.

Из табл. 1 рассчитаны полная проводимость установки $U_{\Sigma} = 759,6$ л/с (4); эффективная скорость откачки системы $S_{эф} = 5,43$ л/с (6); время откачки $\Delta t = 10$ с (3).

Таблица 1

Проводимость элементов системы

Номер элемента системы	Длина L , см	Диаметр D , см	L/D	Проводимость U , см ³ /с
9	17,3	0,7	24,7	$1,1 \cdot 10^6$
10	100	1,6	62,7	$5,2 \cdot 10^6$
13	16,4	1	16,4	$4,5 \cdot 10^6$
15	16,5	2,5	6,6	$1,6 \cdot 10^6$

Ключевые моменты изменения параметров в системе с течением времени проведения эксперимента отображены в табл. 2. Графики изменения температуры и давления в системе с течением времени приведены на рис. 5 и 6.

Таблица 2

Параметры системы

Время, с	Температура датчика, К		Давление в системе, кПа	Показание шкалы, мл	Объем жидкого азота, мл
	нижнего	верхнего			
0	77	77	101	60	300
5	76,7	76,8	30	62	297
10	73,5	73,7	15	62	297
15	69,8	71,6	11	63	294
20	68,4	68,6	9,7	65	291
25	66,0	67,0	8,8	65	291
30	64,2	65,4	7,4	70	281
35	64,0	63,9	6,8	75	271
40	63,1	64,1	6,3	80	263
45	62,8	62,9	5,9	110	206
75	59,7	63,0	4,5	–	–
105	58,9	60,6	4,1	–	–
135	58,4	58,8	3,9	190	36
165	58,6	58,9	4,0	200	38
195	58,1	60,1	3,7	220	0
255	57,3	57,4	2,1	–	–
315	58,0	59,1	1,7	–	–
400	61,1	58,3	1,6	–	–
500	62,4	61,7	1,6	–	–
700	69,7	69,2	1,5	–	–
800	74,5	74,5	1,4	–	–

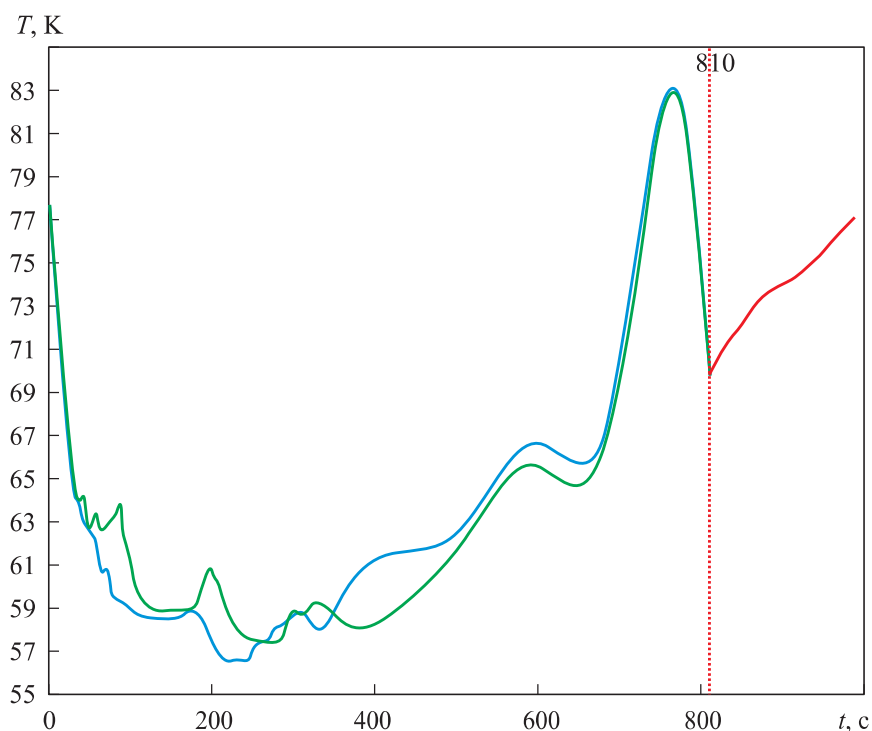


Рис. 5. Зависимость температуры (показания нижнего датчика — синяя линия, верхнего — зеленая) в системе от времени

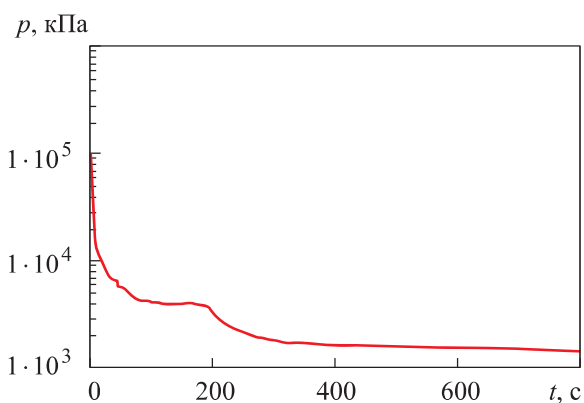


Рис. 6. Зависимость давления в системе от времени

Исходя из данных эксперимента и табл. 2 можно заключить, что азот начал затвердевать спустя 45 с при температуре 62,8 К и давлении 5900 Па, что меньше расчетного в 2 раза. Предположительно, это вызвано положением вакуумметра — давление измерялось непосредственно у входа в насос, а не внутри рабочего объема. Из перерасчета шкалы получаем, что оставшийся объем жидкого азота на момент затвердевания составил 206 мл, или

168 г при плотности азота 808 г/л. Таким образом, испарилось 75 г жидкого азота, т. е. 31 %, что на 3 % больше расчетных значений.

Вследствие бурного кипения жидкий азот начал затвердевать, испаряться, образуя хлопьевидную структуру белого цвета (рис. 7). Весь азот перешел из жидкой фазы в твердую за 195 с при конечной температуре 58,1 К и давлении 3700 Па. Далее происходил процесс сублимации твердого азота вплоть до давления 1400 Па. При попытке извлечь содержимое из сосуда — твердый азот мгновенно сжижился.

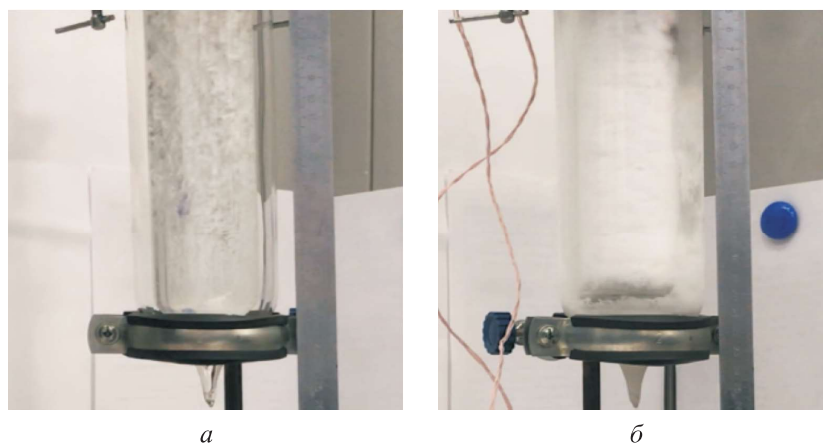


Рис. 7. Жидкая (а) и твердая (б) фазы азота

Заключение. Таким образом, теоретическое моделирование процесса вакуумирования насыщенных паров жидкого азота с принятыми допущениями позволяет рассчитать время откачки системы. На собранном экспериментальном стенде можно достичь температуры 63...77 К, а также успешно ее поддерживать. В будущем планируется модернизация, т. е. улучшение контроля оставшейся жидкости с помощью установки системы на электронные весы, а также учет температуры охлаждения масла в насосе, паров во всасывающей трубке, установка центра кристаллизации внутри сосуда. Отметим, что выбранный диапазон температур успешно используется в дефлегматорах и адсорбционных установках. Вакуумную откачку паров кипящей жидкости можно осуществить не только для азота, но и для неона, аргона и других газов, что свидетельствует об универсальности метода.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Малков М.П., ред. Справочник по физико-техническим основам криогеники. М., Энергоатомиздат, 1985.

- [2] Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д. и др. Термодинамические свойства азота. М., Издательство стандартов, 1977.
- [3] Левченко А.В., Артемьев О.Г., Лавров Н.А. и др. Компенсация потерь азота в атмосфере герметично замкнутого обитаемого объекта. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2018, № 11, с. 33–34.
- [4] Грезин А.К., Зиновьев В.С. Микрокриогенная техника. М., Машиностроение, 1977.
- [5] Song J.B., Kim K.L., Kim K.J., et al. The design, fabrication and testing of a cooling system using solid nitrogen for a resistive high- T_c superconducting fault current limiter. *Supercond. Sc. Technol.*, 2018, vol. 21, no. 2, art. 115023.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/21/11/115023>
- [6] Демихов К.Е., Панфилов Ю.В., ред. Вакуумная техника. М., Машиностроение, 2009.
- [7] Баррон Р.Ф. Криогенные системы. М., Энергоатомиздат, 1989.
- [8] Журлова П.Ю., Губин М.В. Исследование процесса вакуумной откачки паров насыщенного азота с целью получения температур на уровне 63–77 К. *Молодежный научно-технический вестник*, 2016, № 2. URL: <http://ainsnt.ru/doc/834165.html>
- [9] Фролов Е.С., Минайчев В.С., ред. Вакуумная техника. М., Машиностроение, 1985.
- [10] Hoffman D., Singh B., Thomas III J.H. Handbook of vacuum science and technology. Academic Press, 1997.
- [11] Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М., Высшая школа, 2007.
- [12] 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, № S1, с. 41–45.
- [13] Никулин Н.К., Ануфриев И.И. Экспериментальное определение количества газа, адсорбированного на технологических поверхностях откачиваемых объектов. *Сб. науч. работ 37-й Междунар. науч. конф. Евразийского Научного Объединения*. М., ЕНО, 2018, с. 43–45.
- [14] Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. М., Энергия, 1977.
- [15] Самойлович Г.С. Гидрогазодинамика. М., Машиностроение, 1990.

Усцов Артем Алексеевич — студент кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Куприянов Максим Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Усцов А.А., Куприянов М.Ю. Моделирование и экспериментальное исследование процесса вакуумной откачки паров жидкого азота. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 4, с. 95–108.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-4-95-108>

SIMULATION AND REAL-WORLD INVESTIGATION OF THE VACUUM PUMPING PROCESS FOR LIQUID NITROGEN VAPOUR

A.A. Ustsov

uscov.1998@mail.ru

M.Yu. Kupriyanov

kupriyanov.m@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

We performed the required theoretical computations to simulate the process of pumping saturated liquid nitrogen vapours, accounting for the assumptions adopted. The paper provides a schematic of the test bench and describes the sequence of experiment stages. We checked whether the storage Dewar and volumetric vacuum pump were selected correctly so as to ensure the required evacuation level above the liquid nitrogen surface. We built our test bench and conducted an experiment involving thermostating in the 63 to 77 K temperature range, and achieved a phase transition in the nitrogen, it turning from liquid to solid. We computed the mass of the nitrogen evaporated required to reach its triple point temperature. We calculated the effective evacuation rate in the system, taking into account the conductivity of separate components. We determined the minimum vapour evacuation time required. We plotted system temperature and pressure as functions of time. The paper describes possible modernisation of the experimental installation, that is, introducing additional crystallisation centres and monitoring the liquid nitrogen mass using electronic scales

Keywords

Thermostating, vacuum pumping, test bench, storage Dewar, phase transition

Received 26.06.2019

Accepted 20.01.2020

© Author(s), 2020

REFERENCES

[1] Malkov M.P., ed. *Spravochnik po fiziko-tekhnicheskim osnovam kriogeniki* [Handbook on cryogenics physical and technical fundamentals]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985.

- [2] Sychev V.V., Vasserman A.A., Kozlov A.D., et al. Termodinamicheskie svoystva azota [Thermodynamic properties of nitrogen]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1977.
- [3] Levchenko A.V., Artem'yev O.G., Lavrov N.A., et al. Compensation of nitrogen losses in the atmosphere of hermetically closed habitable object. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and Petroleum Engineering], 2018, no. 11, pp. 33–34 (in Russ.).
- [4] Grezin A.K., Zinov'yev V.S. Mikrokriogennaya tekhnika [Microcryogenics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977.
- [5] Song J.B., Kim K.L., Kim K.J., et al. The design, fabrication and testing of a cooling system using solid nitrogen for a resistive high- T_C superconducting fault current limiter. *Supercond. Sc. Technol.*, 2018, vol. 21, no. 2, art. 115023.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/21/11/115023>
- [6] Demikhov K.E., Panfilov Yu.V., eds. Vakuumnaya tekhnika [Vacuum technics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009.
- [7] Barron R.F. Cryogenic systems. Oxford University Press, 1985.
- [8] Zhurlova P.Yu., Gubin M.V. Study on vacuum pumping process of saturated nitrogen vapor in order to obtain temperatures at 63–77 K level. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik*, 2016, no. 2 (in Russ.). Available at: <http://ainsnt.ru/doc/834165.html>
- [9] Frolov E.S., Minaychev V.S., eds. Vakuumnaya tekhnika [Vacuum techniques]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985.
- [10] Hoffman D., Singh B., Thomas J.H. III. Handbook of vacuum science and technology. Academic Press, 1997.
- [11] Rozanov L.N. Vakuumnaya tekhnika [Vacuum techniques]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007.
- [12] Arkharov A.M., Arkharov I.A., Tychkova S.O. On problem of changing cryogenic liquids temperature at the pumping out and storing their vapors. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2010, no. S1, pp. 41–45 (in Russ.).
- [13] Nikulin N.K., Anufriev I.I. [Experimental determination of gas amount adsorbed on the technological surfaces of pumped objects]. *Sb. nauch. rabot 37y Mezhdunar. nauch. konf. Evraziyskogo Nauchnogo Ob'edineniya* [Proc. 37th Int. Sc. Conf. Eurasian Scientific Association]. Moscow, ENO Publ., 2018, pp. 43–45 (in Russ.).
- [14] Grigor'yev V.A., Pavlov Yu.M., Ametistov E.V. Kipenie kriogennykh zhidkostey [Boiling of cryogenic liquids]. Moscow, Energiya Publ., 1977.
- [15] Samoylovich G.S. Gidrogazodinamika [Fluid dynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990.

Ustsov A.A. — Student, Department of Refrigeration, Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Kupriyanov M.Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Refrigeration, Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Ustsov A.A., Kupriyanov M.Yu. Simulation and real-world investigation of the vacuum pumping process for liquid nitrogen vapour. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 4, pp. 95–108 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-4-95-108>

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
press@bmstu.ru
<https://bmstu.press>

Подписано в печать 05.08.2020

Формат 70×108/16

Усл.-печ. л. 9,5

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
baumanprint@gmail.com