

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 539.1.075

**ЖИДКОВОДОРОДНАЯ МИШЕНЬ НА ОСНОВЕ
КРИОРЕФРИЖЕРАТОРА СН-208L**

**©2025 г. И. Г. Бордюжин^а, Н. Г. Козленко^б, С. А. Котов^б, В. М. Нестеров^{а*},
Д. В. Новинский^б, В. В. Рыльцов^а, Д. Н. Свирида^а**

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

*^бПетербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
национального исследовательского центра “Курчатовский институт”*

Россия, 188300, Гатчина Ленинградской обл., мкр. Орлова роща, 1

**e-mail: Slava.Nesterov@gmail.com*

Поступила в редакцию 16.04.2025 г.

После доработки 28.04.2025 г.

Принята к публикации 01.07.2025 г.

Рассматриваются характеристики жидководородной мишени с криорефрижератором СН-208L, используемого для охлаждения мишени и получения жидкого водорода. Основные компоненты созданной установки: криостат, конденсор, контейнеры для сжиженного водорода, система вакуумной откачки, устройства термометрии. Измерены скорости сжижения водорода в режиме криорефрижератора без теплообменника первой ступени. Полученные значения находятся в диапазоне от 50 до 100 мл/ч в зависимости от условий измерений на контейнерах объемом 150 и 500 мл. Наполняемость контейнера объемом 150 мл проверена визуально, контейнера объемом 500 мл - по кривым испарения жидкого водорода в ресивер. Остановка наполнения контейнеров при достижении нужного уровня жидкого водорода осуществляется включением режима стабилизации давления водорода. Соответствующая система стабилизации разработана с использованием функциональных возможностей имеющего температурного контроллера.

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение двухступенчатых криорефрижераторов для создания жидководородной мишени (ЖВМ) представляет определенный интерес с точки зрения развития метода. Низкие температуры в этих устройствах, используемых для сжижения водорода, достигаются

механическим способом (поршень в камере расширения), без применения жидкого гелия в качестве криоагента. Это свойство привлекает внимание, так как оно позволяет сделать компактную мобильную жидководородную установку, позволяющую в ряде случаев избежать проблем с использованием дорогостоящего криогенного гелиевого оборудования, например, в длительных экспериментах на ускорителе. Опыт работы с ЖВМ с гелиевым охлаждением и сжижением водорода был получен нами ранее на установке ЭПЕКУР [1]. Альтернативный способ представляется более простым и безопасным в работе, хотя и возникают вопросы о долговременной стабильности механической системы, о стоимости возможного ремонта, а также о влиянии вибраций. В то же время, функциональные возможности криорефрижераторов становятся более разнообразными: так, применение температурного контроллера в нашем случае позволяет осуществлять также стабилизацию криогенного режима ЖВМ.

2. МОДИФИКАЦИЯ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ

Выходные параметры системы СН-208 (согласно производителю [6]) таковы: $W = 28$ Вт при $T = 77$ К на холодной головке первой ступени, $W = 8$ Вт при $T = 20$ К на холодной головке второй ступени. Для ЖВМ требуются конденсор для сжижения водорода, контейнер для жидкого водорода, а также криостат для сборки криогенных комплектующих и для поддержания их температурных режимов. Последнее возможно за счет создания в криостате изоляционного вакуума не хуже 10^{-6} мбар и теплоизоляции низкотемпературных компонентов.

Контейнер, или водородная мишень, устанавливается в эксперименте на линии пучка налетающих частиц. Была выбрана надлежащая конфигурация мишени, приемлемая для регистрации частиц. Был рассмотрен вариант контейнера объемом до 500 мл, диаметром 70 мм для использования при замене мишени с охлаждением гелием [3] на альтернативное решение с криорефрижератором. Для тестов в экономичном режиме использовался контейнер объемом 150 мл и диаметром 40 мм.

На стадии получения жидкого водорода возможны по крайней мере два варианта: с теплообменником предварительного охлаждения на первой ступени и без теплообменника, когда газообразный водород напрямую подается в конденсор [2]. Во втором варианте скорость сжижения водорода может быть существенно меньше, чем в первом, из-за влияния энтальпии входящего потока, достигающей значений до 4000 Дж/г, тогда как теплота конденсации равна 445 Дж/г. Следуя алгоритму оценок в работе [2] применительно к выходным данным используемой системы, получаем минимальную скорость сжижения 100 мл/ч жидкого водорода.

Мишень объемом 500 мл наполняется сжиженным водородом за 5 ч. Такие затраты во времени в эксперименте с небольшими мишенями представляются вполне приемлемыми. Однако оценки сделаны без учета других реальных теплопритоков, снижающих холодопроизводительность системы. В то же время, сохраняется возможность использования избыточного холода холодной головки первой ступени для снижения энтальпии входящего потока водорода в конденсор.

3. КОНСТРУКЦИЯ ЖИДКОВОДОРОДНОЙ МИШЕНИ

Компоновочная схема узлов ЖВМ представлена на рис. 1.

Рис. 1. Компоновочная схема узлов ЖВМ.

Схема ЖВМ включает криостат, конденсор, контейнер, систему откачки, а также инструменты для измерения процессов охлаждения, сжижения и стабилизации давления водорода. Первая и вторая ступени криорефрижератора находятся внутри криостата. Оболочка криостата состоит из двухтрубных сегментов из нержавеющей стали диаметром 154 мм и 124 мм, длиной 465 мм и 75 мм с толщиной стенки 2 мм. Радиально размещенные выходные патрубки используются для подключения вакуумных насосов, датчиков давления и вакуума, для установки вакуумно-плотных проходных разъемов в четырехпроводных линиях датчиков температуры, для установки герметичных проходных штуцеров водородного контура и для других целей. Схема подключения инструментов ЖВМ также представлена на рис. 1 в сечении криостата в плоскости размещения патрубков. В частности, для датчиков температуры применены цилиндрические соединители 2РМГ24Б19Ш1Е2 с изоляцией контактов из стекла, допускающие вакуумное уплотнение корпуса относительно выходного патрубка. Нижний цилиндрический сегмент криостата является съемным, снизу сегмент закрыт фланцем с патрубком для соединения с аппендиксом криостата.

Медный конденсор цилиндрической формы установлен на холодной головке второй ступени. Соединение осуществлено стяжкой винтами пятак головки с фланцем конденсора. Поверхности соприкосновения предварительно были покрыты смазочной пастой APIEZON. Диаметр конденсора равен 90 мм, внутренний объем 0.8 л, длина 160 мм, масса 1.5 кг. В верхней части конденсора установлены патрубки для ввода газообразного водорода, для соединения с линией байпаса, с находящимся вне кожуха криостата клапаном сброса давления MVS/1 DN 20 с порогом срабатывания 0.6 атм. На нижнем доньшке конденсора размещены термодатчик и нагреватель, установлены штуцеры для соединения с контейнером водородной

мишени. Охлаждение конденсора (рис. 2) происходит с некоторой задержкой по отношению к первой ступени, примерно на 50 мин, задержка зависит от массы конденсора. Тем не менее температуры верхнего и нижнего фланцев в диапазоне 20 К и ниже устанавливаются близкими по величине (разница составляет менее 1К).

Рис. 2. Охлаждение конденсора.

Контейнер ЖВМ находится в отдельной части, в аппендиксе, который соединен с криостатом вакуумпроводом диаметром 45 мм и длиной 600 мм, имеющим телескопический разъем посередине. В стационарном режиме в аппендиксе поддерживается необходимый уровень изоляционного вакуума, создаваемого общей системой откачки. Исследованы контейнеры двух типов: цилиндрический контейнер диаметром 40 мм с обечайкой из двух слоев холоднокатаной алюминиевой (Al) фольги толщиной 70 мкм каждого слоя с прозрачными доньшками из лавсана на концах, объем контейнера 150 мл (атрибут мишени установки ЭПЕКУР), а также контейнер с элементами конструкции алюминиевых банок глубокой вытяжки (банок пищевого назначения); диаметр обечайки 66 мм, толщина стенки 100 мкм, толщина доньшек 300 мкм, объем контейнера 500 мл. Герметичность контейнеров и целостность сборки достигнуты за счет склеивания деталей конструкций эпоксидной смолой с опорными кольцами, на которых установлены патрубки для соединения с конденсором. Через телескопический разъем пайкой оловянным припоем патрубки контейнера соединены с соответствующими трубками конденсора, а также с трубками для слива жидкого и возврата испарившегося водорода на реконденсацию. Используются трубки из нержавеющей стали диаметром 5 мм. Конструкция штуцеров, соединяющих трубки, выполнена в модифицированном варианте, исключающем проникновение компонентов припоя внутрь трубок (это сохраняет их проходимость). Целостность и герметичность сборки проверены в многократных тестах сжижения водорода и в тестах с давлением в контейнере выше 2 атм. При избыточном давлении 6.2 атм возможно изменение формы контейнера из-за выпучивания доньшка контейнера (свойство доньшек исходника) [4]. Контроль охлаждения и наполнения контейнеров жидким водородом осуществляется термодатчиками на обечайке контейнеров. Для контейнера диаметром 66 мм применялся аппендикс с обечайкой диаметром 200 мм, длиной 200 мм с толщиной стенки 2 мм с выходным окном из алюминиевой фольги. Для контейнера диаметром 40 мм применялся алюминиевый аппендикс диаметром 80 мм, длиной 250 мм с толщиной стенки 1 мм. На кожухе аппендикса установлены входные окна из майлара. До десяти слоев алюминированного майлара используется для теплоизоляции криогенных узлов.

4. СИСТЕМА ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ

Создание изоляционного вакуума в кожухе криостата мишени осуществляется двумя турбомолекулярными насосными станциями HiCube 80 Eсо [5], в которых применены турбонасосы HiPасе 80, установленные непосредственно на кожухе криостата и управляемые через кабели дистанционного управления от операционного блока DCU. Каждый из турбонасосов соединен с кожухом через клапан AVC040 PA, дистанционно пневматически управляемый с панели приборов. Форвакуумные блоки станций размещены отдельно на стойке приборов и соединены с турбонасосами вакуумными шлангами длиной до 3 м. Один из турбонасосов через систему клапанов и гибких металлических шлангов сильфонного типа используется также для откачки внутренних и внешних частей водородного контура в технических процедурах работы с водородом. Для измерения вакуума применяются компактные широкодиапазонные вакуумные датчики PKR 251. Для измерения давления водорода используются электронные мановакууметры SPT4V0030PA4W02.

5. СЖИЖЕНИЕ ВОДОРОДА

Газообразный водород из баллонов низкого давления объемом 300 л, наполненных до давления 1.52 атм, подается напрямую в конденсор ЖВМ. Кривые охлаждения, сжижения и испарения, полученные в тестовом режиме ЖВМ, представлены на рис. 3. Кривая P_1 (рис. 3, 4) иллюстрирует процесс изменения давления в водородном контуре при сжижении водорода.

Рис. 3. Температурные кривые ЖВМ в процессах охлаждения, сжижения и испарения водорода.

Рис. 4. Давление водорода в водородном контуре.

Кривая P_1 состоит из участков, где проявляются охлаждение конденсора, охлаждение контейнера, наполнение контейнера жидким водородом и испарение жидкого водорода. Охлаждение контейнера происходит за счет образования порции конденсата, который в системе конденсор-контейнер претерпевает испарение и реконденсацию, что приводит в итоге к охлаждению контейнера. Процесс охлаждения контейнера занимает десятки минут, имеется корреляция начала и окончания процесса охлаждения с температурными данными, соответственно, кривые T_d и T_c . Далее конденсация сопровождается наполнением холодного контейнера жидким водородом. Этому процессу на кривой P_1 (рис.3) соответствует участок линейного снижения давления в водородном контуре. При выключении компрессора (рис. 3, на 250-й минуте) происходит сравнительно быстрое испарение жидкого водорода из конденсора

из-за теплопритока к ступеням. Окончание процесса испарения сопровождается скачком температуры конденсора на отопление. Из-за прекращения реконденсации испаряющийся водород контейнера поступает непосредственно в резервуар. Температура контейнера сохраняется постоянной практически до полного восстановления давления в резервуаре. Окончание испарения сопровождается скачком температуры контейнера на отопление. Полученные данные свидетельствуют о заполнении контейнера жидким водородом. В тех случаях, когда конденсация не сопровождалась наполнением контейнера, находились и причины этому: нарушение проходимости трубок, возросший теплоприток к контейнеру и др. На опытных образцах контейнера объемом 150 мл с прозрачными доньшками на концах были получены данные как с визуальным контролем наполнения, так и с контролем наполнения по испарению (в одном и том же тесте). Наблюдалось совпадение результатов.

6. СТАБИЛИЗАЦИЯ ДАВЛЕНИЯ ВОДОРОДА

Контроль процесса сжижения водорода осуществляется с помощью температурного контроллера, модель 336 LakeShoreCryotronics. При окончании наполнения контейнера жидким водородом включается режим стабилизации давления водорода, в котором поддерживается равновесное состояние между процессами конденсации и испарения, это состояние тем самым обеспечивает сохранение параметров мишени: уровня и плотности жидкого водорода. Для стабилизации давления используются функциональные возможности контроллера – возможность стабилизации температуры холодной головки криорефрижератора путем контролируемого нагрева ее посредством петли обратной связи $T_{\Gamma} - W_{\Gamma}$, где T_{Γ} – температура головки в кельвинах, W_{Γ} – мощность нагревателя головки в ваттах. Применительно к ЖВМ, установив нагреватель на конденсор, удастся вручную кратковременно стабилизировать давление. Чтобы автоматизировать процесс, мы подаем сигнал с датчика давления на контроллер, который при определенных условиях воспринимает поступивший сигнал как сигнал от датчика температуры из каталога контроллера, снабженного пользователем соответствующей температурной кривой. Теперь давление водорода ассоциируется с виртуальной температурой в кельвинах. В результате стало возможным стабилизировать давление водорода путем контролируемого нагрева конденсора с помощью закрытой петли обратной связи $T_{\text{в}} - W_{\text{к}}$, где $T_{\text{в}}$ – показания виртуального датчика в кельвинах, отвечающие определенному давлению водорода, $W_{\text{к}}$ – мощность нагревателя конденсора в ваттах. Опорное значение T_{set} , определяющее давление при наполненном контейнере, стартовые значения $W_{\text{к}}$ и

параметров ПИД-контроля (пропорционально-интегрально-дифференциального) заносятся вручную с использованием клавиш передней панели контроллера.

Полученный в режиме закрытой петли обратной связи результат, иллюстрирующий эффект стабилизации, представлен на рис.4 (кривая P_2). В этом тесте давление водорода поддерживается постоянным на уровне 804 ± 1 мм рт. ст. по измерению контроллером или 1.058 ± 0.005 атм по измерению мультиметром за час наблюдения с соответствующими погрешностями измерительных приборов. Другое представление режима стабилизации, приведенное на рис. 5 с кривыми наполнения мишени жидким водородом, указывает на сохранение объема жидкого водорода при включенной стабилизации давления. Наполнение контейнеров объемом 150 мл (кривая V_1) проверено путем визуального контроля через прозрачные доньшки из майлара. Наполнение контейнера объемом 500 мл (кривая V_2) оценено при наблюдении за процессом испарения при отеплении холодных головок, когда основной объем испаряющегося водорода поступает в ресивер при сохранении температуры контейнера, близкой к температуре жидкого водорода, а температура конденсора находится вне области конденсации. Таким способом было установлено наполнение контейнера объемом 500 мл.

Рис. 5. Наполнение мишени сжиженным водородом.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ниже представлены кривые сжижения, полученные в тестах при крайних значениях скорости сжижения (рис. 6). Для контейнера объемом 150 мл – это кривые P_1 и P_2 , скорости сжижения соответственно 100 и 75 мл/ч, для контейнера объемом 500мл – это P_3 и P_4 , скорости сжижения соответственно 60 и 50 мл/ч. В измерениях использовались аппендиксы из алюминия (диаметром 80 мм и длиной 250 мм для первого контейнера, диаметром 200 мм и длиной 200 мм для второго). Есть различие также в площадях поверхностей контейнеров и в геометрии теплопритока излучением. Измеренная средняя скорость сжижения (70 мл/ч) и оценочное значение (100 мл/ч), полученное выше, находятся в приблизительном согласии. Однако точное попадание в оценочное значение не представляется правдоподобным. Скорее всего, при измерениях P_1 имело место некоторое охлаждение входящего потока в патрубке перед конденсором, небольшое охлаждение за счет теплообмена излучением с холодной головкой первой ступени, оказавшегося заметным из-за извилистой конструкции входного патрубка над поверхностью головки. Далее в измерениях P_2 , P_3 , P_4 , как и показано на рис. 1, использовалась прямая подводящая трубка над холодной головкой первой ступени, и результат со значением

100 мл/ч уже отсутствует.

Рис. 6. Кривые сжижения водорода, измеренные в тестах с контейнерами 150 мл...

В настоящей статье проверена работоспособность криогенной системы в режиме ЖВМ; получен полный комплект температурных характеристик по охлаждению, сжижению и испарению водорода; найдены и реализованы конструкционные решения по конденсору, контейнеру, а также по криостату ЖВМ. Скорость сжижения водорода достигает значений до 75 мл/ч для варианта без теплообменника первой ступени. Ускорение процесса возможно за счет использования избыточного холода первой ступени. В рамках концепции виртуального термодатчика осуществлен режим стабилизации давления водорода с применением температурного контроллера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев И.Г., Бордюжин И.Г., Будковский П.Е. и др. // ПТЭ. 2014. № 5. С. 22.*<https://doi.org/10.7868/S0032816214050024>
2. *Green M.A. The Liquefaction of Hydrogen and Helium using Small Coolers. LBNL-62459.*
3. *Круглов С.П., Козленко Н.Г., Малахов Л.Д. и др. // ПТЭ. 1997. Т. 40. № 6. С. 23.*
4. *Алюминиевые банки глубокой вытяжки. ГОСТ 33748-2018.*
5. <http://www.pfeiffer-vacuum.com>
6. <https://shicryogenics.com/>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Компоновочная схема узлов ЖВМ: СН – криорефрижератор с криостатом; 1, 2 – холодные головки; К – конденсор; М – аппендикс с контейнером ЖВМ; MVP, TMP, TC, TPS, DCU – комплектующие турбомолекулярной насосной станции; AVC – дистанционно пневматически управляемый клапан; PS – блок питания; N – азот под давлением 6 атм; ABCDH – температурный контроллер; T_A , T_C , T_D – датчики температуры; V_B – датчик давления водорода SPT4V; H – нагреватель; PKR 251 – вакуумметр, MV – мановакуумметр, MVS – клапан с регулятором давления, RV – клапан аварийного сброса давления.
- Рис. 2.** Охлаждение конденсора: T_a – температура головки первой ступени, T_b – температура верхнего фланца, T_n – температура нижнего фланца конденсора, $\Delta T = T_n - T_b$ – разность температур, цена делений для ΔT составляет 2.5 К. Охлаждение конденсора до водородных температур происходит с запаздыванием (здесь на 50 минут) по отношению к первой ступени, задержка зависит от массы конденсора; ΔT в начале охлаждения равна 6 К, в конце – доли К.
- Рис. 3.** Температурные кривые ЖВМ в процессах охлаждения, сжижения и испарения водорода. Наложенная кривая P_1 представляет соответствующее изменение давления водорода в водородном контуре в диапазоне 1.5–1.0 атм. Компрессор выключен на 250-й минуте. Температура контейнера сохраняется вплоть до полного испарения.
- Рис. 4.** Давление водорода в водородном контуре: P_1 – компрессор выключен на 250-й минуте, P_2 – с включенной стабилизацией давления водорода.
- Рис. 5.** Наполнение мишени сжиженным водородом. Наполнение контейнеров происходит на линейных (наклонных) участках кривых V_1 и V_2 . Горизонтальные участки кривых – результат стабилизации давления водорода, которая сопровождается сохранением достигнутого уровня жидкого водорода в мишени соответственно 170 и 180 мл, из которых по 25 мл находится преимущественно в конденсоре. Кривая V_1 получена в тестах с контейнером объемом 150 мл, V_2 – с контейнером объемом 500 мл.
- Рис. 6.** Кривые сжижения водорода, измеренные в тестах с контейнерами объемом 150 мл в диапазоне P_1 – P_2 , и с контейнером объемом 500 мл в диапазоне P_3 – P_4 .

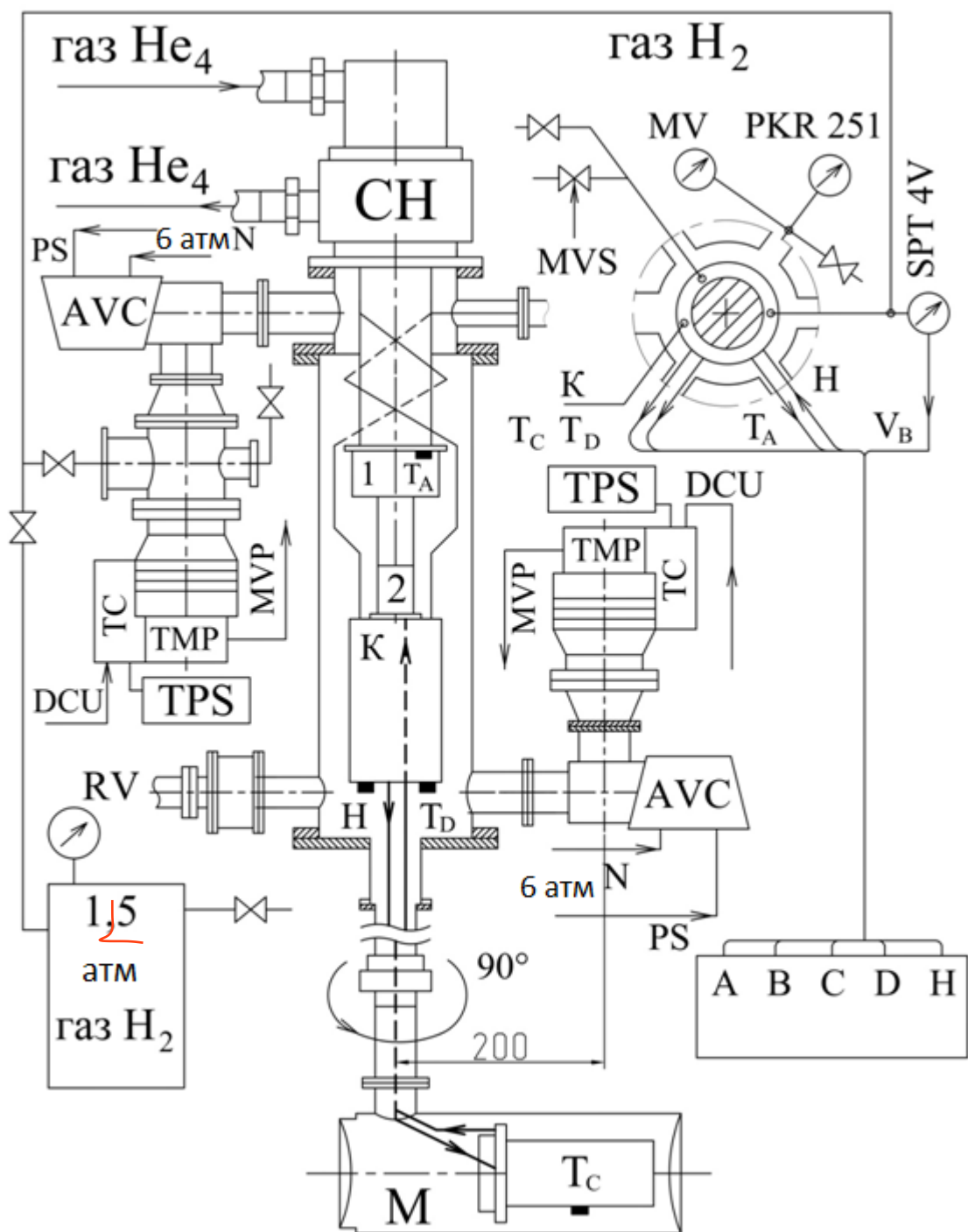


Рис. 1.

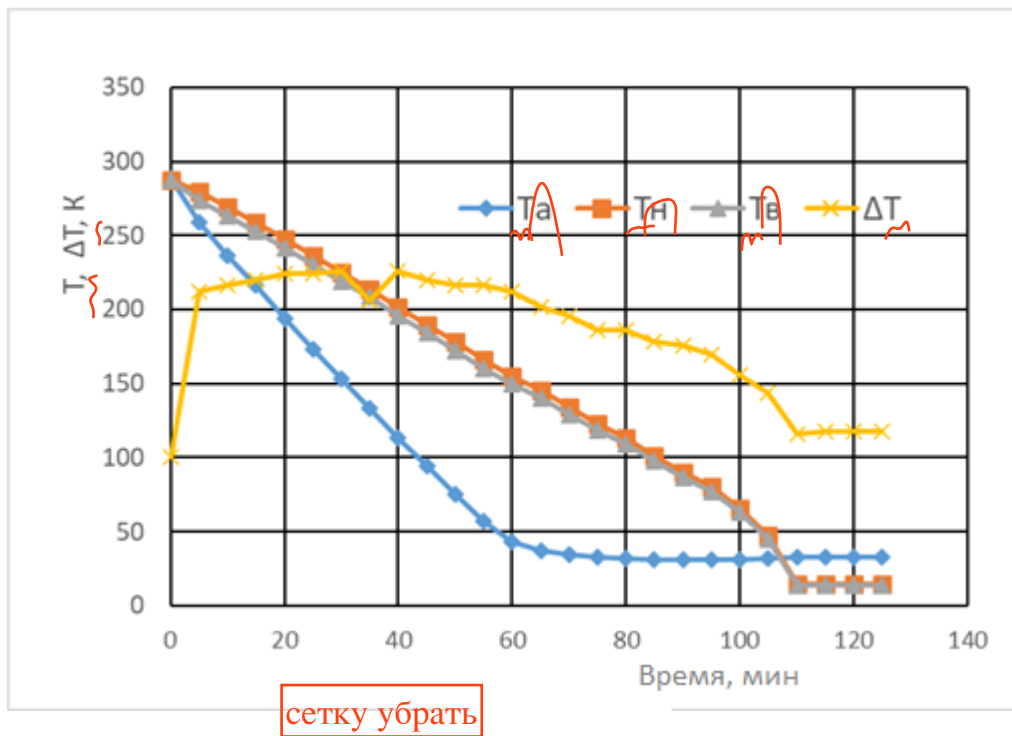


Рис. 2.

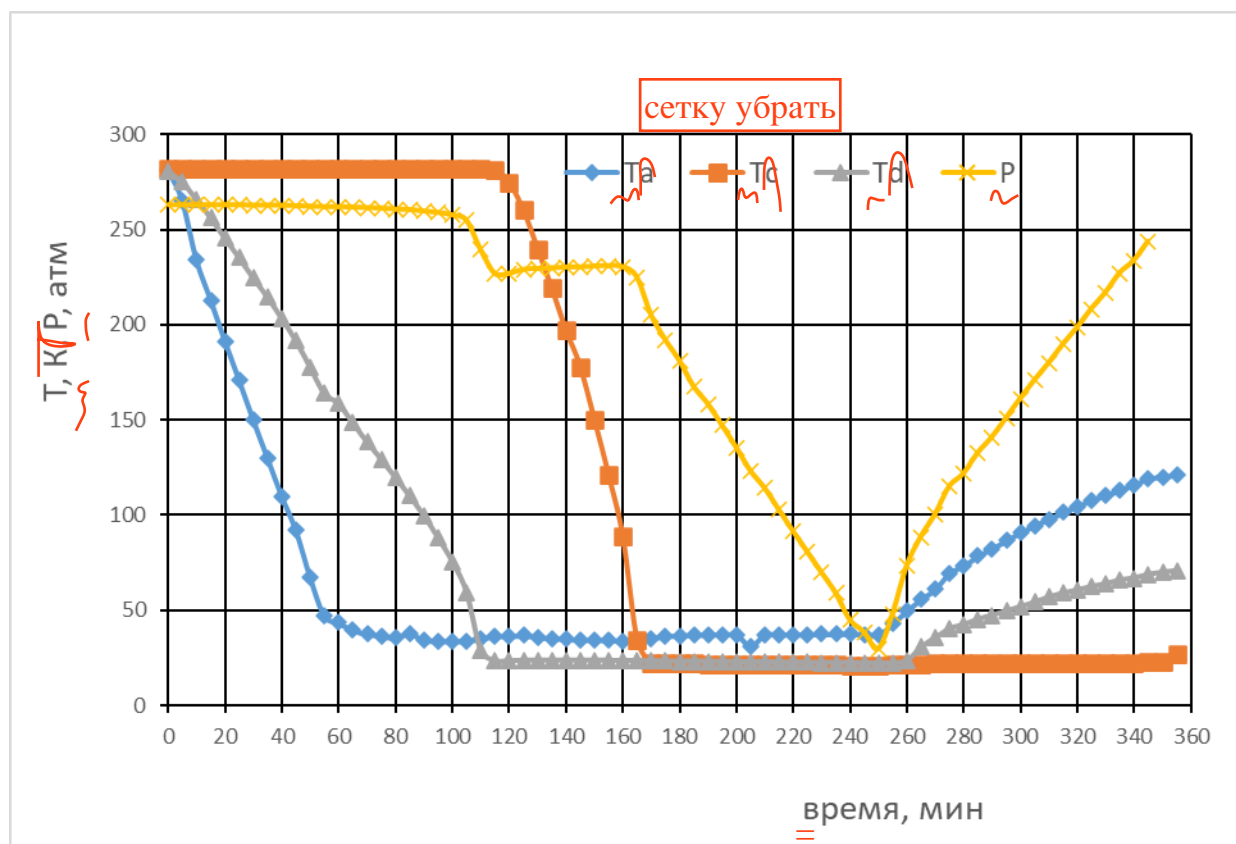


Рис. 3.

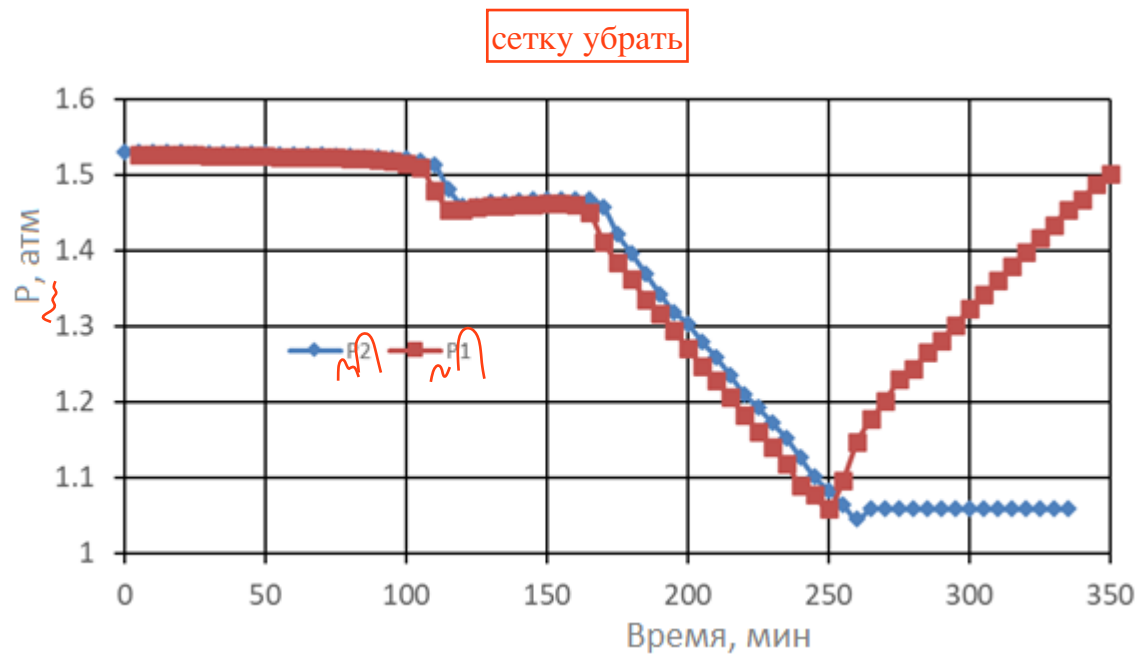


Рис. 4.

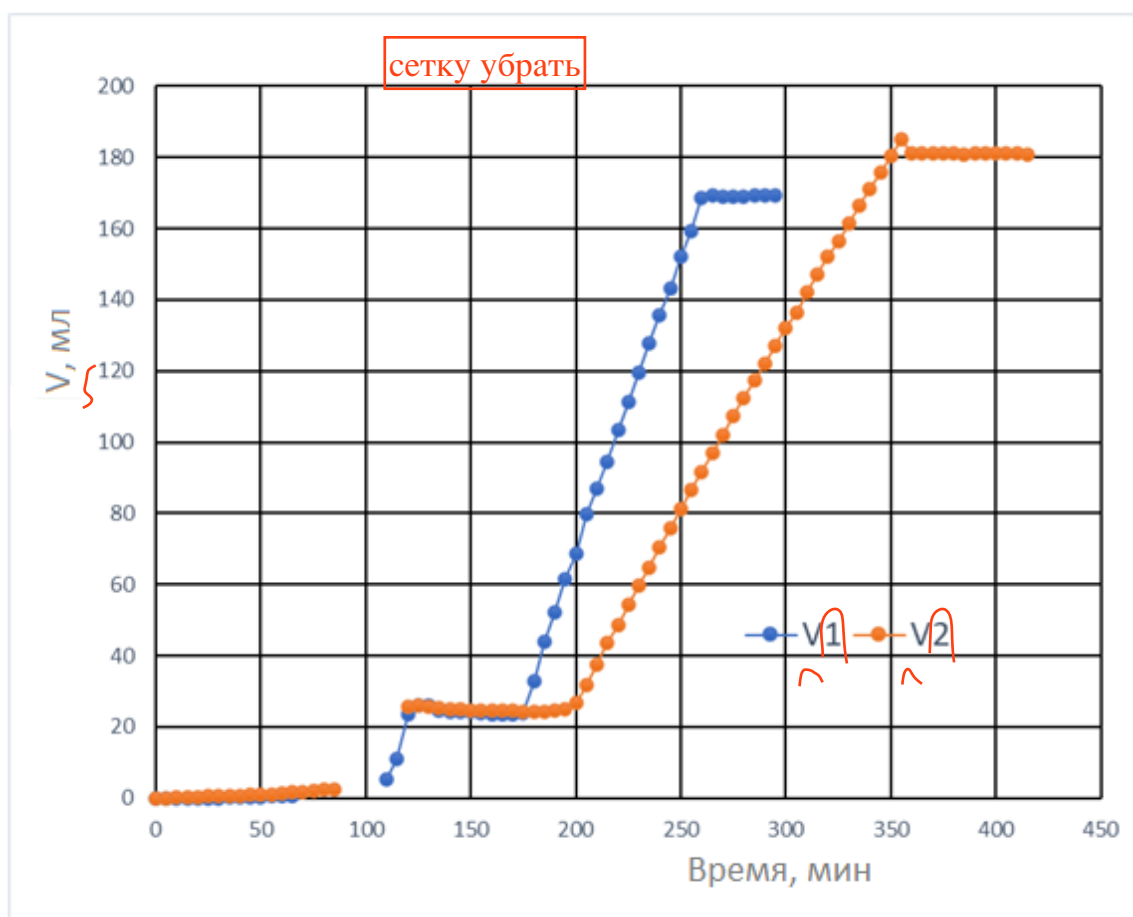


Рис. 5.

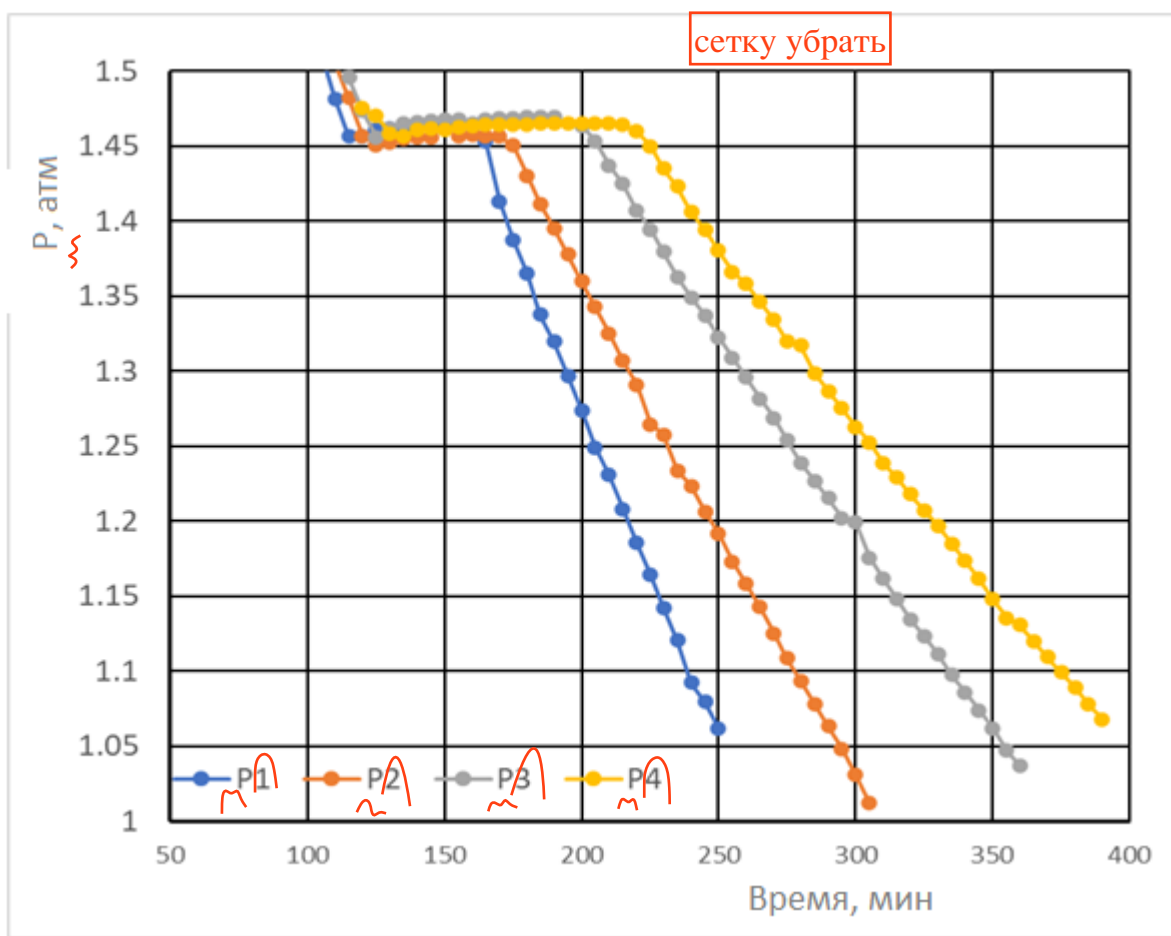


Рис. 6.