

## СИЛЬФОННАЯ КАМЕРА В КАЧЕСТВЕ ДОЖИМАЮЩЕЙ СТУПЕНИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ 1 ГПа В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

© 2023 г. С. И. Ниненко<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup>Институт физики высоких давлений РАН  
Россия, 108840, Москва, Калужское шоссе, 14

\*e-mail: ninenko@hppi.troitsk.ru

Поступила в редакцию 24.11.2022 г.

После доработки 13.01.2023 г.

Принята к публикации 24.01.2023 г.

Описана дожимающая ступень установки для сжатия газовой среды до 1 ГПа, в качестве которой используется тонкостенная сильфонная камера, погруженная в гидростатически сжатую среду. Такая конструкция позволяет создавать требуемое давление в рабочем объеме более 1.5 см<sup>3</sup>, что достаточно и для оптических исследований, и для точных измерений давления в рабочей камере.

DOI: 10.31857/S0032816223030254, EDN: CWVCRP

### ВВЕДЕНИЕ

Получение давления газа 1 ГПа в объемах более 1 см<sup>3</sup> является весьма сложной задачей и выполняется в несколько этапов. Предварительное сжатие газовой среды обычно выполняют промышленно выпускаемыми газовыми компрессорами, которые позволяют получать на выходе давление 0.2 ГПа. Известны компрессоры высокого давления, до 0.4 ГПа, например мембранные компрессоры модели КСВД-М (НПП “Ковинт”, Россия, г. Санкт-Петербург, <http://covint.ru/>). В литературе описаны компрессоры, позволяющие получать давление 0.5 ГПа и даже 0.6 ГПа [1].

Дальнейшее повышение давления газа связано с большими техническими сложностями создания надежного уплотнения поршня мультипликатора. В работе [2] описан компрессор, позволяющий получать сверхвысокое давление гелия до 2 ГПа. Вариант установки, в которой было достигнуто давление газов 2 ГПа без использования подвижных деталей, описан в работе [3]. Установка состоит из последовательно соединенных капиллярными трубками баллонов с внутренними электронагревателями и отсечными обратными клапанами и действует по принципу многократного термического расширения рабочего тела. Необходимо отметить, что такие установки имеют крупные габариты и технически сложны, что сказывается на их обслуживании и работоспособности.

В работе [4] описана установка, позволяющая проводить оптические исследования как в газовой, так и в жидкой среде при давлениях до 1 ГПа в широком температурном диапазоне, 200–500 К, с высокой точностью измерения давления. Чтобы избежать влияния температуры на точность измерения давления, было принято решение использовать две камеры, соединенные капилляром. Это позволило измерять давление во всем диапазоне с точностью 1.0–1.5 МПа, но увеличило суммарный объем рабочей среды в этих камерах до 1.5 см<sup>3</sup>.

Установка разделена на две ступени по уровню рабочего давления. На первой ступени с помощью термобарической камеры в исследуемой среде создается давление до 200 МПа. На второй ступени давление увеличивается до заданного уровня с помощью сильфонной камеры. Эта установка предназначена для изучения поведения сверхкритических флюидов в N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и в других средах.

### СИЛЬФОННАЯ КАМЕРА

В литературе описаны различные конструкции сильфонных камер высокого давления. Они позволяют перекачивать жидкости даже под давлением 40 МПа [5] и избегать каких-либо утечек рабочей среды. Их использование при более высоких давлениях ограничено прочностью боковых стенок сильфона при увеличивающемся перепаде внутреннего и внешнего давлений.



**Рис. 1.** Сильфонная камера в разобранном виде. 1 – тонкостенный компенсатор давления; 2 – внутренняя втулка; 3 – внешняя втулка; 4 – внешняя разрезная втулка; 5 – плунжер; 6 – уплотнительные кольца; 7 – металлический стержень; 8 – катушка из нихромовой проволоки; 9 – цилиндр с контактом.

В данной статье описана установка, в которой в качестве дожимающей ступени была использована сильфонная камера, помещенная в гидростатически сжатую среду. Разность давлений в двух средах определялась силой упругости сильфонной камеры и не превышала 1.5–2.0 МПа при давлении среды 1 ГПа.

В конструкции сильфонной камеры (рис. 1) были использованы тонкостенные сильфоны – компенсаторы давления 1. Каждый такой компенсатор представляет собой сильфонный бочонок из нержавеющей стали с толщиной стенки 0.2 мм, внутренний диаметр бочонка 13.3–13.4 мм, а внешний 22 мм. Компенсаторы необходимо последовательно герметично соединить. Такое соединение должно выдерживать перепад давления 2 МПа и оставаться работоспособным до давления 1 ГПа. В установке для этого были использованы две втулки: внутренняя 2 и внешняя 3, в которых на месте стыка компенсаторов были выполнены небольшие канавки, заполненные силиконовым герметиком Gasket Maker. Для обеспечения осевой прочности конструкции использовалась еще одна внешняя разрезная втулка 4, на торцах которой сделаны выступы, помещаемые в складку компенсатора. Для фиксации такой втулки в собранном виде она обматывалась проволокой. Необходимо отметить, что эти детали изготавливались индивидуально с высокой точностью по размерам каждого такого стыка компенсаторов для обеспечения плотной посадки. Итоговый внешний диаметр конструкции не

превышал 22.5 мм. В одном торце такой сборки внутренняя втулка сделана как продолжение гайки, с помощью которой вся сильфонная камера крепится на плунжере 5. На плунжере также закреплен набор уплотнительных колец 6 для удержания жидкости, создающей давление.

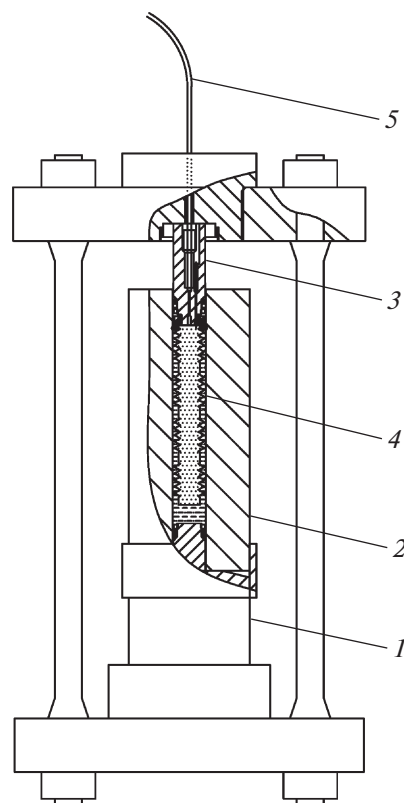
Для увеличения эффективности работы сильфонной камеры по ее оси расположен металлический стержень 7 диаметром 13.1 мм. К стержню крепится реостат – катушка 8 из нихромовой проволоки на эбонитовой втулке с общим внешним диаметром 8.3 мм, используемый для определения длины (объема) сильфонной камеры. По катушке скользит цилиндр 9 с внутренним диаметром 8.5 мм, в котором имеются медные контакты на пружинном креплении. Во избежание случайного соприкосновения катушки с цилиндром на его торце закреплена тефлоновая втулка с внутренним диаметром 8.4 мм. Другой торец цилиндра совмещен с внутренней втулкой и фиксируется в торце сборки компенсаторов.

Столь малые зазоры (0.1 мм) на длине в несколько сантиметров между свободно скользящими деталями конструкции (цилиндр с контактом по катушке и компенсаторы по стержню) позволили уменьшить минимальный объем сильфонной камеры до 3 см<sup>3</sup>, в то время как максимально возможный объем составляет 45 см<sup>3</sup>. Если мы учтем объемы рабочей камеры, камеры измерения давления и системы капилляров, то получим, что отношение максимального и минимального объемов составит 10 : 1. Таким образом, мак-

симальные давления в установке могут быть достигнуты без использования предельных положений сильфонной камеры.

Для работы сильфонной камеры используется вспомогательная установка высокого давления (рис. 2). Она состоит из малогабаритного гидравлического пресса *1* с усилием 1200 кН, цилиндра высокого давления *2* с внутренним диаметром 24 мм и пары плунжеров с уплотнениями. На верхнем плунжере *3* крепится сильфонная камера *4*. В корпусе этого плунжера имеются два канала диаметром 0,9 мм. Один из каналов используется для ввода проводов, а другой — для соединения объема сильфонной камеры с остальной установкой при помощи капилляра высокого давления *5*. Опорой верхнего плунжера является гайка, расположенная в верхней станине пресса. Цилиндр высокого давления изготовлен из бронзы БрБ2, обработанной на твердость 36–38 НRс. Плунжеры изготовлены из сплава P18 (HRс 58–60), а в качестве уплотнений использовался набор колец: резинового, фторопластового прямоугольного сечения и трапецеидального из латуни. Для удобства работы нижний плунжер пресса жестко связан с цилиндром высокого давления. Получившаяся емкость заполняется полиэтилсилоксановой жидкостью ПЭС-5 — средой, передающей давление и сохраняющей гидростатичность во всем используемом диапазоне давлений. Сжатие жидкости осуществляется путем поднятия цилиндра высокого давления совместно с нижним плунжером на неподвижный верхний плунжер.

Собранная и проверенная на герметичность сильфонная камера крепится на верхнем плунжере и опускается в рабочую зону, предварительно заполненную жидкостью ПЭС-5. Камера опускается на 8–10 мм, пока уплотнения полностью не войдут в канал. Из-за разной сжимаемости исследуемой среды и жидкости ПЭС-5 погружение сильфонной камеры происходит за счет уменьшения ее объема. Количество жидкости ПЭС-5 в рабочей зоне внешней камеры трудно рассчитать, поэтому оно подбирается экспериментально. Если жидкости будет слишком много, то сильфонная камера будет меньшего объема, и даже при давлении среды 150–200 МПа ее размеры не увеличатся до значений, близких к максимальным. Если жидкости будет недостаточно, то часть рабочей зоны останется заполненной воздухом, и невозможно будет создать требуемое давление в жидкости ПЭС-5. На практике используется предварительное растяжение сильфонной камеры, т.е. в ней создается избыточное давление в 1,0–1,5 МПа до ее погружения в рабочий канал.



**Рис. 2.** Вспомогательная установка высокого давления. *1* — гидравлический пресс; *2* — цилиндр высокого давления; *3* — верхний плунжер; *4* — сильфонная камера; *5* — капилляр высокого давления.

С ростом гидростатического давления в рабочем канале заметно возрастает вязкость жидкости ПЭС-5. Градиент давления вдоль сильфонной камеры может привести к ее необратимой деформации и выходу из строя. Именно по этой причине в установке использован пресс с ручным управлением и возможностью плавного повышения или понижения давления в рабочем канале.

В заключение отметим, что вся установка для создания давления в газовой среде до 1 ГПа, включая термостат, занимает всего 4 м<sup>2</sup> и размещается в отдельном помещении для защиты оптических компонент установки (лазерного источника и монохроматора). В конструкции установки отсутствуют газовые уплотнения для подвижных соединений, есть только стационарные присоединения. Установка позволяет получать давление в рабочей камере до 1 ГПа для азота (N<sub>2</sub>) в температурном диапазоне 200–500 К. По завершении запланированной серии экспериментов данная установка будет использована для получения давления в CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и других газах.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность С.М. Стишову, А.Н. Утюжу и О.Б. Циоку за полезные обсуждения конструкции установки, а также А.И. Рябову за изготовление деталей экспериментальной установки.

Автор отдельно выражает благодарность В.В. Бражкину за поставленную интересную задачу.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-12-00111).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Верещагин Л.Ф., Иванов В.В.* А.с. № 97915 СССР // Оpubл. 1952.
2. *Стишов С.М., Уваров А.Ф.* // ПТЭ. 1975. № 4. С. 191.
3. *Boksha S.S.* // Journal of Crystal Growth. 1968. V. 3–4. P. 426.
4. *Ninenko S.I., Brazhkin V.V.* // Review of Scientific Instruments 2022. V. 93. Issue 11. P. 113905 <https://doi.org/10.1063/5.0094655>
5. *Полянин А.Б., Алексеев А.Б., Турчин С.И.* Патент № 2690316 РФ // Оpubл. 31.05.2019. Бюл. № 16.