

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАСХОДОМЕРОВ НА ОСНОВЕ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

*С. В. Гудков^а, Т. Г. Жиронкина^а, А. В. Константинов^а,
Ю. А. Митрофанова^а, Д. С. Швидкий^а*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

Расход газа через установки систем криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA является параметром, измерение которого играет важную роль при эксплуатации и обслуживании оборудования, а также оптимизации технологического процесса. Контроль величины расхода сжатого гелия через адсорберы блоков маслоочистки и осушки гелия МО-800 позволяет отслеживать время выработки защитного действия адсорбента и своевременно осуществлять его замену. В работе представлена методика подбора расходомера на основе диафрагмы и измерения расхода через нее для блока маслоочистки и осушки гелия МО-800 №4. Диафрагма с соответствующими КИП была смонтирована на линии выхода сжатого гелия из блока в феврале 2024 г. Для измерения расхода, контроля остаточного ресурса адсорбента, своевременного информирования оператора в апреле 2024 г. было разработано и введено в эксплуатацию программное обеспечение в составе АСУ ТП МО-800 №4. Также рассматриваются случаи возможного применения диафрагм: измерение производительности компрессорного оборудования и холодопроизводительности криогенных установок.

The gas flow rate through the cryogenic supply systems of the NICA accelerator complex is a parameter whose measurement plays a decisive role in the operation and maintenance of equipment, as well as in the optimization of the technological process. Monitoring the measurement of compressed helium flow rate through the MO-800 adsorbent cleaning and drying units allows one to track the time of production of the adsorbent's protective effect and replace it in a timely manner. The paper presents a methodology for selecting a diaphragm-type flow meter and measuring the flow through it for the MO-800 No.4 oil purification and drying unit. In February 2024, a diaphragm with control and measuring instruments was installed on the compressed helium outlet line from the unit. In April 2024, a software package for measuring flow, monitoring the residual amount of adsorbent and promptly informing the operator was developed and implemented in the MO-800 No.4 automated process control system. The paper also examines possible applications of diaphragms: measuring the performance of compressor equipment and the refrigeration capacity of cryogenic installations.

PACS: 07.20.Mc; 29.20.db

1. РАСХОД КАК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТР СИСТЕМ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Для ускорительного комплекса NICA создаются гелиевая и азотная системы криогенного обеспечения. Гелиевая система строится как результат модернизации существующей системы криогенного обеспечения нуклотрона [1]. Целью модернизации является увеличение холодопроизводительности комплекса от 4000 до 10 000 Вт при 4,5 К за счет ввода в эксплуатацию нового оборудования: компрессоров и рефрижераторов.

Азотная система производительностью 2300 кг/ч является вновь создаваемой системой, которая также включает в себя компрессорное оборудование, ожижитель, реконденсаторы.

Расход газа через установки гелиевой и азотной систем криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA является параметром, измерение которого играет важную роль при эксплуатации и обслуживании оборудования, а также оптимизации технологического процесса.

Ниже рассматриваются результаты и перспективы применения расходомера на основе диафрагмы (стандартного сужающего устройства) для создания системы контроля остаточного ресурса угольных адсорберов блоков маслоочистки и осушки гелия МО-800, контроля производительности компрессоров и холодопроизводительности рефрижераторов.

2. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАСХОДОМЕРОВ

2.1. Контроль остаточного ресурса адсорбентов блока маслоочистки и осушки гелия МО-800. Одним из элементов гелиевой системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA, для которого необходим контроль расхода газа, является блок маслоочистки и осушки гелия МО-800. В системе используются четыре таких блока.

Блок маслоочистки и осушки гелия МО-800 предназначен для очистки сжатого гелия от паров масла и влаги. Пары масла адсорбируются активированным углем марки СКТ-4 в двух переключающихся адсорберах 201 и 301, входящих в состав блока (рис. 1); осушка гелия производится в двух переключающихся адсорберах 401 и 501, заполненных синтетическим цеолитом типа NaX.

Общее время защитного действия угольных адсорберов 201 и 301 составляет 5000 ч (по 2500 ч при поочередном включении адсорберов) при расходе очищаемого газа $q_m = 800$ кг/ч. Таким образом, для каждого угольного адсорбера расчетная очищаемая масса газа за время защитного действия $t = 2500$ ч составляет $M = q_m t = 2 \cdot 10^6$ кг. Так как при работе криогенного комплекса используются компрессоры различной производительности, контроль защитного действия угольного адсорбера (выработки ресурса адсорбента) необходимо осуществлять по расчетной величине очищаемой массы газа M . По ее достижении активированный уголь заменяется новым.

Срок службы цеолита составляет 6 лет. По его достижении производится замена адсорбента.

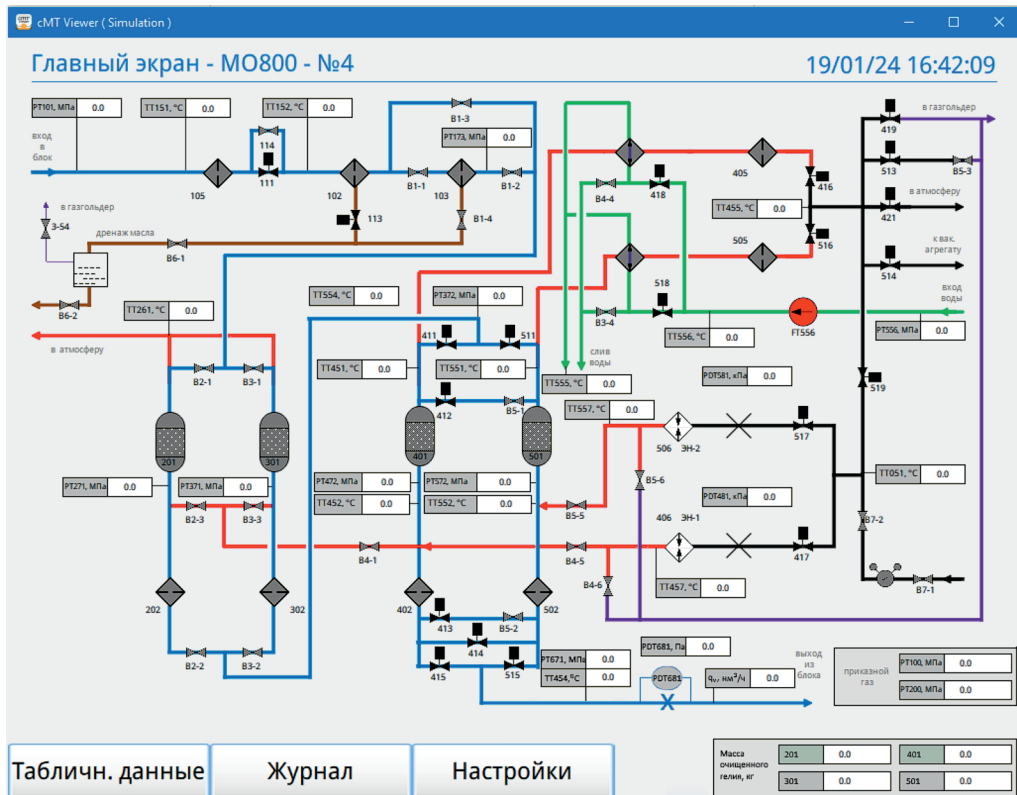


Рис. 1. Мнемосхема блока маслоочистки и осушки гелия МО-800 № 4 на графической панели блока

Расходомер, установленный на коллекторе сжатого гелия после блока МО-800, обеспечит измерение расхода гелия через адсорберы блока, контроль выработки ресурса и срока службы адсорбентов и своевременную организацию регламентных работ по замене адсорбентов.

В ходе пусконаладочного сеанса № 4 инъекционного комплекса NICA произошла выработка ресурса активированного угля одного из блоков МО-800: пары масла, проходя отработавший адсорбент, попадали далее по коммуникациям в первый теплообменник гелиевого сателлитного рефрижератора РСГ-2000/4.5 № 1 бустера, что приводило к их вымораживанию на входном фильтре и его забивке.

В результате расход газа через установку снижался, что приводило к уменьшению холодопроизводительности системы и невозможности ее дальнейшей работы. Для восстановления рабочего режима с некоторой периодичностью производился останов рефрижератора для отогрева и продувки теплообменника и фильтра.

Для обеспечения в дальнейшем надежной работы криогенного комплекса необходимо создать систему контроля остаточного ресурса угольных адсорберов для каждого блока МО-800. Такая система контроля на основе расходомера, установленного на выходе из блока МО-800 № 4, была введена в эксплуатацию в феврале 2024 г.

Ввод в эксплуатацию систем контроля остаточного ресурса адсорбентов для остальных трех блоков осушки и маслоочистки МО-800 запланирован на 2025 г.

2.2. Контроль производительности компрессорного оборудования. В гелиевой системе криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA используются компрессоры различных типов и модификаций. Расходомер, установленный на линии нагнетания компрессора, позволяет измерить его производительность для подтверждения паспортного значения и, при необходимости, провести мероприятия по выводу ее к этому значению (устранению причин, уменьшающих производительность: негерметичность клапанов и т. п.). Блоки маслоочистки и осушки гелия МО-800 установлены на линии нагнетания из компрессоров. Поэтому вышеуказанный расходомер, установленный на выходе из блока МО-800 № 4, может быть также использован для измерения производительности каждого из компрессоров.

2.3. Оптимизация цикла работы рефрижераторных установок. Важнейшим элементом системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA являются гелиевые установки: три сателлитных рефрижератора РСГ-2000/4.5 и две установки КГУ-1600/4.5.

Измерение расхода сжатого гелия через турбодетандерный поток установок КГУ-1600/4.5 позволит определить холодопроизводительность детандеров, а также провести оптимизацию цикла установок путем подбора оптимальной пары газовых турбодетандеров, что приведет к снижению энергозатрат компрессии криогенного комплекса во время ускорительных сеансов.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ РАСХОДОМЕРОВ И ВЫБОР УСТРОЙСТВА

Классификация расходомеров осуществляется по следующим критериям: виду измеряемого расхода, принципу измерения, конструкции первичных преобразователей, компоновке. По принципу измерения [2] расходомеры делятся на расходомеры переменного перепада давления, постоянного перепада давления — ротаметры, ультразвуковые, вихревые и др.

Первоочередной задачей являлся ввод в эксплуатацию системы контроля остаточного ресурса адсорбентов блока МО-800 № 4. Рассматривались два варианта: ультразвуковой расходомер и расходомер переменного перепада давления на основе диафрагмы.

Ввиду меньших габаритов, стоимости, удобства монтажа, простоты обслуживания и опыта эксплуатации был выбран расходомер на основе диафрагмы. На криогенном комплексе регулярно ведется работа на компрессорах небольшой производительности, поэтому необходимо измерять малые расходы ($300\text{--}350\text{ нм}^3/\text{ч}$) гелия с минимальной погрешностью. Выполнение этого условия также обеспечивается использованием диафрагмы.

Внешний вид диафрагмы, смонтированной на трубопроводе выхода из блока МО-800 № 4, приведен на рис. 2. Диафрагма представляет собой пластину с отверстием в середине. Давление газа, проходящего через диафрагму, падает, при этом разница давлений до сужения и после него пропорциональна скорости, и следовательно, расходу проходящего газа. Измеряя перепад давления на диафрагме с помощью дифференциального датчика давления, можно вычислить расход газа через нее.

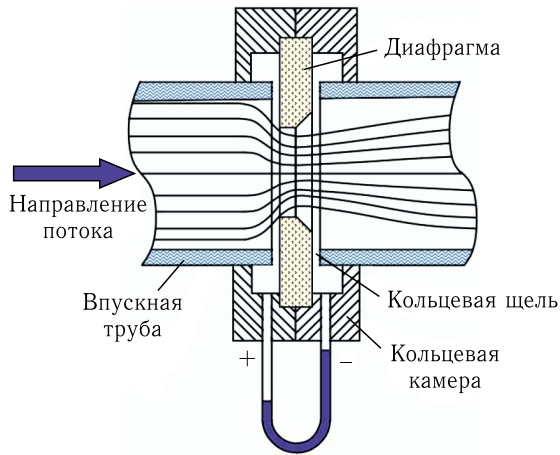


Рис. 2. Расходомер на основе диафрагмы

Для обеспечения точности измерения перепада давления при монтаже диафрагмы необходимо соблюсти требования по ГОСТ 8.586-2 [4] и определить типы местных сопротивлений на трубопроводе до и после места установки диафрагмы и, в зависимости от их типа, обеспечить прямолинейные участки определенной длины до и после диафрагмы для сглаживания потока, исключения завихрений и, соответственно, пульсаций скорости.

4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСХОДА ЧЕРЕЗ ДИАФРАГМУ

Расчет расхода через диафрагму проводился по ГОСТ 8.586.1-2005 [3], ГОСТ 8.586.2-2005, ГОСТ 8.586.5-2005 [5].

Диаметр отверстия сужающего устройства (диафрагмы), пределы измерения КИП его обвязки подбирались с учетом номинального расхода газа, рабочего давления и температуры среды, а также с учетом местных сопротивлений на участках до и после места установки диафрагмы.

Данные, используемые для расчета расхода через подобранную диафрагму:

- динамическая вязкость гелия в рабочих условиях [6]: $\mu = 1,980 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$;
- плотность гелия при рабочих условиях [6]: $\rho \text{ [кг/м}^3\text{]}$;
- показатель адиабаты для гелия: $k = 1,66$;
- абсолютное давление гелия перед диафрагмой: $p_{\text{abs}} \text{ [Па]}$;
- перепад давления на диафрагме: $\Delta p_{\text{real}} \text{ [Па]}$;
- диаметр отверстия сужающего устройства: $d = 0,049656 \text{ м}$;
- внутренний диаметр трубопровода перед диафрагмой: $D = 0,098 \text{ м}$.

Объемный расход через диафрагму при нормальных условиях:

$$q_v = \frac{3600 C E \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \Delta p_{\text{real}} \rho}}{\rho_{\text{norm}}} \text{ нм}^3/\text{ч}, \quad (1)$$

где C — коэффициент скорости истечения диафрагмы с угловым способом отбора перепада давления определяется по ГОСТ 8.586.2-2005; E — коэффициент скорости

входа определяется по ГОСТ 8.586.1-2005; ε — коэффициент расширения определяется по ГОСТ 8.586.2-2005.

5. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РАСХОДОМЕРА НА ОСНОВЕ ДИАФРАГМЫ

5.1. Создание системы контроля выработки ресурса. Диафрагма необходима для расчета расхода гелия через адсорберы блока МО-800, контроля выработки ресурса и срока службы адсорбентов и своевременной организации регламентных работ по замене адсорбентов.

В 2023 г. в дополнение к шкафам местного управления блоков МО-800 № 3, 4 было внедрено программное обеспечение для возможности контроля технологических параметров и состояния арматуры на графических панелях в составе этих шкафов.

Весной 2024 г. программное обеспечение блока МО-800 № 4 было доработано: реализована возможность расчета расхода гелия через адсорбер и массы очищаемого адсорбером газа по перепаду давления на установленной диафрагме. Аналогичная система контроля будет введена в эксплуатацию для каждого из блоков МО-800 № 1–3 в 2025 г.

5.2. Измерение производительности компрессоров станции КС № 1. Весной 2024 г. было проведено измерение производительности гелиевых компрессорных установок компрессорной станции № 1. В ходе измерений производился поочередный запуск компрессоров. Циркуляция гелия осуществлялась через диафрагму, установленную на линии выхода из блока МО-800 № 4. Измеряемый перепад давления на диафрагме пересчитывался в объемный расход, соответствующий производительности компрессора. Для дополнительного подтверждения результатов проводились измерения расхода при одновременной работе двух компрессоров в различных сочетаниях.

Таблица 1. Производительность компрессоров станции КС № 1

Наименование компрессора	Δp , Па	Расчетная производительность G , $\text{нм}^3/\text{ч}$	Производительность (паспорт), $\text{нм}^3/\text{ч}$
Компрессор № 1	194	929	1200
Компрессор № 2	277	1110	1200
Компрессор № 3	242	1038	1200
Компрессор № 4			
(половина производительности)	21	305	360
Компрессор № 4	100	667	720
Компрессор № 5	89	629	720
Компрессор № 6	91	643	720
Компрессоры № 2, 3	1017	2127	—
Компрессоры № 3, 4	660	1714	—
Компрессоры № 4			
(половина производительности), 6	200	943	—
Каскад-80/25 № 1	5765	5118	5040
Каскад-80/25 № 2	5270	4893	5040

Результаты измерения производительности компрессоров станции КС № 1 приведены в табл. 1.

По результатам измерений были проведены работы по оптимизации технологического процесса на винтовом компрессоре «Каскад-80/25» № 1: производительность компрессора была увеличена от 4800 до 5118 нм³/ч.

5.3. Расходомеры для рефрижераторов КГУ-1600/4.5. На каждом из двух рефрижераторов КГУ-1600/4.5 планируется установка расходомера на основном и турбодетандерном потоках соответственно. В настоящее время ведутся работы по определению технических характеристик каждой диафрагмы и КИП ее обвязки; определяются оптимальные места их установки с учетом местных сопротивлений соответствующих трубопроводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ввиду меньших габаритов, стоимости, удобства монтажа, простоты обслуживания и опыта эксплуатации для создания системы контроля выработки ресурса адсорбентов блока маслоочистки и осушки гелия МО-800 № 4 был выбран расходомер на основе диафрагмы. Разработанная система контроля выработки ресурса адсорбентов обеспечит их своевременную замену и тем самым надежную работу криогенного комплекса.

Летом 2024 г. были заказаны диафрагмы для блоков МО-800 № 1–3 криогенного комплекса. Ввод в эксплуатацию систем контроля выработки ресурса адсорбентов запланирован на 2025 г.

Установленный расходомер позволил провести измерения производительности гелиевых компрессоров компрессорной станции КС № 1. Первые сравнительные результаты показали работоспособность диафрагмы и достоверность вычислений. Измерение производительности компрессоров обеспечит, при необходимости, проведение мероприятий по ее выводу на паспортные значения.

В настоящее время ведутся работы по подбору диафрагм для измерения основного и турбодетандерного потоков гелиевого рефрижератора КГУ-1600/4.5 с целью оптимизации его технологического процесса и увеличения холодопроизводительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agapov N. et al.* Cryogenic Technologies of the Superconducting NICA Accelerator Complex // Proc. 15th IIR Conf. Cryogenics. Prague, 2019.
2. *Кремлевский П. П.* Расходомеры и счетчики количества веществ: Справ. Кн. 2 / Под общ. ред. Е. А. Шорникова. 5-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2004. 412 с.
3. ГОСТ 8.586.1-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 1. Принцип метода измерений и общие требования. 01.01.2021.
4. ГОСТ 8.586.2-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 2. Диафрагмы. Технические требования. 01.01.2021.
5. ГОСТ 8.586.5-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 5. Методика выполнения измерений. 01.01.2021.
6. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.

Получено 28 октября 2024 г.